



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Eletrônica**

**SISTEMA DE MOTORIZAÇÃO
ELÉTRICA PARA BICICLETAS**

**Autor: Rodrigo Araújo Eckstein
Orientador: Dr. Marcus Vinicius Batistuta**

**Brasília, DF
2017**



RODRIGO ARAÚJO ECKSTEIN

SISTEMA DE MOTORIZAÇÃO ELÉTRICA PARA BICICLETAS

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Dr. Marcus Vinicius Batistuta

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

EEC19s	<p>Eckstein, Rodrigo Araújo</p> <p>Sistema de motorização elétrica para bicicletas / Rodrigo Araújo Eckstein; orientador Marcus Vinicius Batistuta. -- Brasília, 2017.</p> <p>60 p.</p> <p>Monografia (Graduação - Engenharia Eletrônica) -- Universidade de Brasília, 2017.</p> <p>1. Bicicleta elétrica. 2. Controlador de motor elétrico sem escovas. 3. Microcontrolador ATmega328. I. Batistuta, Marcus Vinicius. II. Sistema de motorização elétrica para bicicletas</p>
--------	--



SISTEMA DE MOTORIZAÇÃO ELÉTRICA PARA BICICLETAS

Rodrigo Araújo Eckstein

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 10/07/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Marcus Vinicius Batistuta, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Luís Filomeno de Jesus Fernandes, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2017

Esse trabalho é dedicado a toda minha família, especialmente a meus irmãos: Guilherme, Natália, Bruno, Roger, Júlia e Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por todos os acontecimentos bons e ruins. Pois mesmo que ruins, serviram como aprendizado.

Minha mãe Paula e pai Guilherme com os quais cresci e aprendi a viver, mas infelizmente tive que deixá-los no Rio de Janeiro para poder estudar em Brasília.

Agradeço meu pai Ricardo pelos conselhos, ensinamentos e, principalmente, pela paciência, me suportando nos momentos de stress e ansiedade. Também por ser o melhor cúmplice e companheiro nos diversos dias de vitória.

Minha namorada Karoline por me incentivar na reta final do curso, momento em que já estava exausto e esgotado.

Meus amigos que estudaram comigo e também aqueles que sempre garantiam boas risadas nos momentos de entretenimento. Agradeço a todos pela ótima companhia e aprendizagem que puderam proporcionar.

*“Escolhe um trabalho de que gostes,
e não terás que trabalhar nem um
dia na tua vida.”*

- Confúcio.

RESUMO

Concepção, projeto, simulação e validação com testes em Bancada e em campo de um Kit de Motorização Elétrico para uma bicicleta genérica, que inclui um circuito controlador do motor, utilizando transistores do tipo MOSFET e um banco de baterias seladas de chumbo-ácido tradicionais. Para o carregamento das baterias será desenvolvido um carregador com base em conversor do tipo corrente alternada-corrente contínua (CA-CC) que utilizará MOSFETs para chaveamento. O circuito controlador deverá gerenciar o motor sem escovas de CC 350W que estará acoplado, pelos raios, ao aro da bicicleta, formando o conjunto traseiro de tração. Em paralelo ao motor, haverá uma catraca para que possa ser utilizado o pedal simultaneamente com o motor, deixando a bicicleta híbrida. No painel digital serão mostradas informações como velocidade, tensão da bateria e rotação. Todas as funções de controle, acionamento e instrumentação são processadas pelo microcontrolador, ATmega328 (mesmo do Arduino Uno), que será configurado usando o ambiente de programação Arduino. Os sensores *Hall* que estão embutidos no motor são usados para detectar a posição de rotação e ordenar a sequência de acionamento.

Palavras-chave: Bicicleta elétrica. motor de corrente contínua. controlador do motor sem escovas, eletrônica de potência, arduino, sensor *hall*, conversor buck.

ABSTRACT

Design, simulation and validation with Bench and field Tests of an electrical Motorization Kit for a generic bicycle, which includes a motor controller circuit, using MOSFET type transistors and a bank of traditional lead-acid sealed batteries. For charging the batteries, a converter-based charger of type alternating current – direct current (AC-DC) will be developed that will use MOSFETs for switching. The controller circuit shall manage the DC 350W brushless motor which is coupled by the spokes to the rim of the bicycle, forming the traction rear assembly. Parallel to the engine, there will be a ratchet so that the pedal can be used simultaneously with the engine, making a hybrid bicycle. Information such as speed, battery voltage, and rotation will be displayed on the LCD. All control functions, such as drive and instrumentation are performed by the ATmega328 microcontroller (used in Arduino Uno) for purposes processing. Hall sensors that are embedded in the motor are used to detect the rotation position and drive sequence order.

Keywords: Electric al bicycle, brushless DC motor, electronic motor controller, arduino, hall sensor, power electronics, buck converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais componentes da bicicleta (Adaptado de “Guia MTB”).....	19
Figura 2: Primeira patente de uma bicicleta elétrica	20
Figura 3: Forças atuantes.....	21
Figura 4: Gráfico de potência necessária em função da inclinação, com uma velocidade de cruzeiro de 15km/h.....	23
Figura 5: Gráfico de potência necessária em função da velocidade, com inclinação de 0%.....	23
Figura 6: Motor CC elementar.....	25
Figura 7: Vista interna do motor BLDC.....	26
Figura 8: Sensores do tipo <i>Hall</i> posicionados dentro do motor BLDC	27
Figura 9: Efeito <i>Hall</i> num semiconductor	27
Figura 10: Estrutura plana de MOSFET de canal N	28
Figura 11: Transistores NPN e PNP.....	29
Figura 12: Optoacoplador 4N25.....	30
Figura 13: Circuito integrado do microcontrolador ATmega328P-PU.....	31
Figura 14: Bateria chumbo-ácida selada	31
Figura 15: Gráfico exemplo da curva aproximada do tempo de descarga.....	33
Figura 16: Gráfico da autonomia em função da velocidade.....	33
Figura 17: Gráfico da autonomia em função da demanda por potência < 50%.....	34
Figura 18: Gráfico da autonomia em função da demanda por potência > 50%.....	34
Figura 19: Bicicleta elétrica tração traseira.....	36
Figura 20: Controlador genérico para bicicletas elétricas.....	37
Figura 21: Fluxograma do sistema.....	38
Figura 22: Display de cristal líquido.....	39
Figura 23: MOSFET Canal-N	40
Figura 24: Ponte trifásica.....	40
Figura 25: Motor com sensores <i>Hall</i> acoplados internamente.....	41
Figura 26: Esquemático para o resistor <i>pull-up</i> no sensor <i>Hall</i>	42
Figura 27: Arduino Uno	43
Figura 28: Exemplo circuito tipo Buck.....	44
Figura 29: Diagrama do circuito optoacoplador e <i>driver</i>	45

Figura 30: Circuito Push-Pull.....	45
Figura 31: Circuito teste de resposta do transistor IRF3205.....	46
Figura 32: Transistor IRF3205 sendo ativado.....	47
Figura 33: Transistor IRF3205 sendo desativado.....	47
Figura 34: Circuito teste de resposta do transistor IRF4905.....	48
Figura 35: Transistor IRF4905 sendo ativado.....	48
Figura 36: Transistor IRF4905 sendo desativado.....	49
Figura 37: Diagrama do circuito de obtenção de dados.....	50
Figura 38: Diagrama do circuito carregador.....	50
Figura 39: Tensão sem filtro após ponte retificadora.....	51
Figura 40: Tensão com filtro, na entrada do segundo estágio.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cálculo da potência necessária, variando a velocidade.....	24
Tabela 2. Cálculo da potência necessária, variando a inclinação e adotando velocidade de cruzeiro de 15 km/h.....	24
Tabela 3. Corrente constante de descarga em Ampères (25°C) da Moura 12MVA-7 obtida no datasheet descarregando até a tensão 1,75V por célula.....	32
Tabela 4. Ordem de chaveamento para cada fase do motor de acordo com a posição obtida pelos sensores <i>Hall</i>	42
Tabela 5. Nomenclatura de acordo com a cor dos fios.....	44

LISTA DE SIGLAS

A	Ampère
BLDC	Brushless Direct Current Motors
B	Bytes
C	Celsius
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPU	Central Processing Unit
CPV	Comutações por Volta
F	Farads
h	Hora
H	Henry
Hz	Hertz
I	Input
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LEV	Light Electric Vehicles
m	Metro
M	“Mega”, prefixo do sistema de unidades (fator 10^6)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
O	Output
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RMS	Root Mean Square
ROM	Read Only Memory
s	Segundos
SCSM	Self Controlled Synchronization Motor
TJB	Transistor de Junção Bipolar
USB	Universal Serial Bus
V	Volt
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Micro
C_{min}	Capacitância mínima
C_R	Coeficiente de Rolagem
dt	Derivada do tempo
dV	Derivada da tensão
d	Largura da barra
ϵ_y	Constante de permissividade elétrica do meio
F_a	Força Aerodinâmica
F_g	Força da Gravidade
F_p	Força de Propulsão
F_r	Força de Rolagem
g	Aceleração da Gravidade em m/s^2
I	Inclinação
I_{max}	Corrente Máxima
k	“quilo”, prefixo do sistema de unidades (fator 10^3)
K_A	Fator de Arrasto
M	Massa do Conjunto em kg
η	Eficiência da Transmissão
P	Potência em Watts
V	Velocidade da Bicicleta em m/s
V_H	Tensão <i>Hall</i>
V_i	Tensão de Entrada
$V_{média}$	Tensão média
V_o	Tensão de saída
V_p	Tensão de pico
W	Velocidade do Vento em Sentido Contrário em m/s

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.3. OBJETIVO	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1. BICICLETA	19
2.1.1. Potência necessária em aclives	21
2.2. MOTORES ELÉTRICOS	25
2.2.1. Motor corrente continua de ímãs permanentes	25
2.3. SENSOR <i>HALL</i>	27
2.4. TRANSISTOR MOSFET	28
2.5. TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR (TJB)	29
2.6. OPTOACOPADOR	30
2.7. MICROCONTROLADOR	30
2.8. BATERIA CHUMBO/ÁCIDO	31
2.8.1. Capacidade da bateria	32
2.8.2. Autonomia aproximada	32
3. METODOLOGIA	35
3.1. PESQUISA DE MERCADO	35
3.2. SUBSISTEMAS	38
3.2.1. Subsistema de interface com o usuário	39
3.2.2. Subsistema de potência	40
3.2.3. Subsistema motor e sensores <i>Hall</i>	41
3.2.4. Subsistema de controle	43
3.2.5. Subsistema de carregamento das baterias	43
3.3. DIAGRAMAÇÃO E MONTAGEM DOS CIRCUITOS	44
3.3.1. Circuito optoacoplador e <i>driver</i>	45
3.3.2. Circuito de controle e sensores	50
3.3.3. Circuito carregador	50
4. CONCLUSÃO	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
6. BIBLIOGRAFIA	60

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará a contextualização sobre o tema abordado durante o trabalho, assim como a motivação, justificativa, objetivo e organização do mesmo.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento das cidades faz com que os deslocamentos fiquem cada vez maiores e congestionados. O Art.1º da Lei da Política Nacional de Mobilidade Urbana, nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012 diz que: “A Política Nacional de Mobilidade Urbana é instrumento da política de desenvolvimento urbano de que tratam o inciso XX do art. 21 e o art. 182 da Constituição Federal, objetivando a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas no território do Município” [1].

Percebe-se que os problemas de mobilidade urbana vêm ganhando espaço na agenda política, assim, mais investimentos são feitos para que a população consiga se locomover rapidamente e com eficiência. Ciclovias vêm sendo criadas e ampliadas para facilitar o uso de veículos alternativos, tais como as bicicletas. [1]

Para pequenos trajetos, ir a pé ou de bicicleta convencional mostra-se bastante eficaz. Porém, os médios e longos deslocamentos ficam sem alternativas para quem não quer pegar congestionamentos ou simplesmente economizar um pouco, pois indo a pé ou de bicicleta convencional seria muito cansativo e a pessoa ficaria suada, não sendo uma boa opção para quem vai trabalhar, estudar ou simplesmente sair com os amigos.

A bicicleta elétrica vem para contornar esses problemas, já que auxilia a pessoa durante trajetos de vários quilômetros. Atualmente, pode-se optar por caminhos com grandes elevações e distâncias longas que serão facilmente completados graças à potência extra, obtida através do motor acoplado à roda.

1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Este trabalho é uma oportunidade de aplicar os conhecimentos de Engenharia Eletrônica, adquiridos ao longo da graduação, principalmente na área de Eletrônica de Potência na qual pretendo me especializar.

Desenvolver um veículo de transporte individual eficiente, de baixo custo inicial e pouca manutenção para pequenos e médios trajetos, como alternativa aos carros e ônibus que são altamente poluentes, saturam as vias e provocam congestionamentos.

Ampliar a utilização de um meio de transporte barato e sustentável por um grupo maior de pessoas, no sentido de que com a ajuda do motor, não é necessário ter preparo físico especial, podendo ser utilizado por idosos e sedentários. E até como forma de incentivar a prática de atividade física regular, tendo em vista que os pedais não serão retirados.

Ao pesquisar kits de motorização elétrica para bicicletas, foi observado no conjunto dos componentes que o controlador de potência é o segundo item de maior custo, perdendo apenas para o motor, independentemente da potência.

1.3. OBJETIVO

Desenvolver um sistema de motorização elétrica para bicicletas com foco no controlador, que será baseado no microcontrolador ATmega 328p, o mesmo utilizado pelo Arduino Uno.

Esse sistema possui:

- Um motor *direct drive* que vem acoplado ao cubo de roda da bicicleta
- Uma central de controle, que controla a potência enviada ao motor bem como o correto acionamento do mesmo. Além de mostrar informações como velocidade e estimar a capacidade restante da bateria.
- Um banco de baterias de modo que se obtenha a tensão necessária para o correto funcionamento do sistema.

- Um circuito de interface entre a central e o usuário, por exemplo, *display* velocímetro, acelerador e indicador de bateria.
- Sistema de carregamento inteligente do banco de baterias, de modo que prolongue a vida útil do mesmo.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Primeiramente foi feita uma introdução mostrando o contexto em que o trabalho de insere, seguido pela motivação e justificativa que levaram a escolha do tema. Os objetivos foram definidos de modo que pudessem ser aplicados os conceitos desenvolvidos durante o curso de graduação em Engenharia Eletrônica.

No capítulo 2 são abordados temas e conceitos pertinentes ao projeto, faz-se uma breve revisão sobre o estado da arte do tema, além de cálculos e estudos utilizados como base para adoção dos parâmetros de projeto.

O capítulo 3 mostra a metodologia adotada e explica as funções de cada subsistema bem como circuitos, diagramas e algoritmos. São apresentadas ainda, algumas simulações para validação dos circuitos e componentes utilizados.

No capítulo 4 tem-se a conclusão do trabalho, item valioso onde é apresentado o resultado final, evidenciando a obtenção do êxito ou o insucesso diante dos objetivos pré-definidos, assim como expor o que pode ser realizado para obter melhores resultados ou até mesmo resultados diferentes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo apresentará a revisão bibliográfica sobre os diferentes componentes e equipamentos constituintes da bicicleta, incluindo os elementos em que a deixarão com a motorização elétrica e painel de informações.

2.1. BICICLETA

A bicicleta é um veículo simples de propulsão humana. Geralmente usado para lazer ou transporte de pessoas e pequenas cargas, dotada basicamente de 10 componentes como mostram-se na Figura 1.

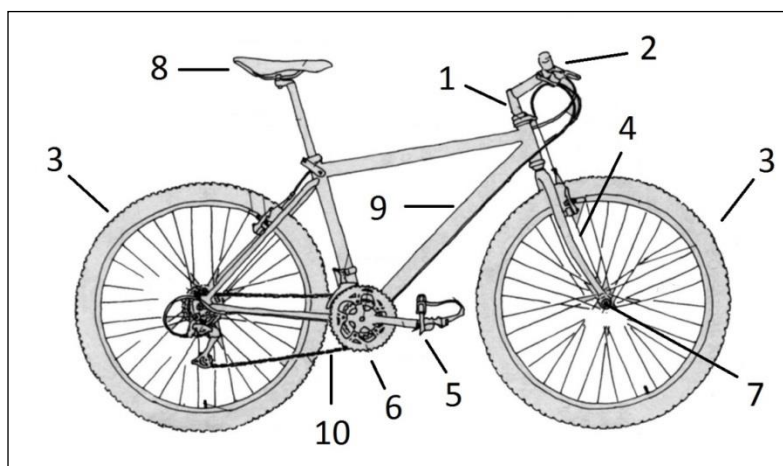


Figura 1: Principais componentes da bicicleta (Adaptado de “Guia MTB”) [2].

1. Mesa (ou avanço): peça que conecta o guidão ao garfo.
2. Guidão: peça tubular fixada na parte de cima do garfo, com o propósito de direcionar os movimentos da bicicleta.
3. Rodas: são compostas de quatro elementos – pneu, aro, raios e cubo.
4. Garfo dianteiro: peça semelhante a uma forquilha, que aloja a roda dianteira e faz parte do conjunto de direção da bicicleta.

5. Pedal: é conectado ao eixo do movimento central através da pedivela.
6. Coroa: aro dentado que transmite o movimento da pedalada para a corrente.
7. Cubo: elemento central da roda, em volta do qual a roda gira e onde são fixados o garfo e os raios.
8. Selim: assento do ciclista.
9. Quadro: peça de grande importância da bicicleta, onde se fixam todas as outras partes.
10. Corrente: conjunto de elos metálicos flexíveis, que transmite o movimento da coroa para o pinhão.

As primeiras patentes de bicicletas elétricas datam do fim do século XIX. Em 1895, Ogdem Bolton Jr. inventou um modelo sem engrenagens e dois anos depois Hosea W. Libbey of Boston inventou um modelo que utilizava dois motores.

Hoje, a bicicleta elétrica é um mercado em expansão com grandes indústrias pelo mundo. Em 2009, foi estimada a existência de 200 mil bicicletas elétricas pelos Estados Unidos. Na Alemanha, a produção ultrapassa a marca de 400 mil unidades. No Brasil, o mercado ainda está em desenvolvimento e a maioria dos modelos presentes ou é importada ou possui componentes de fora. [3] e [4]

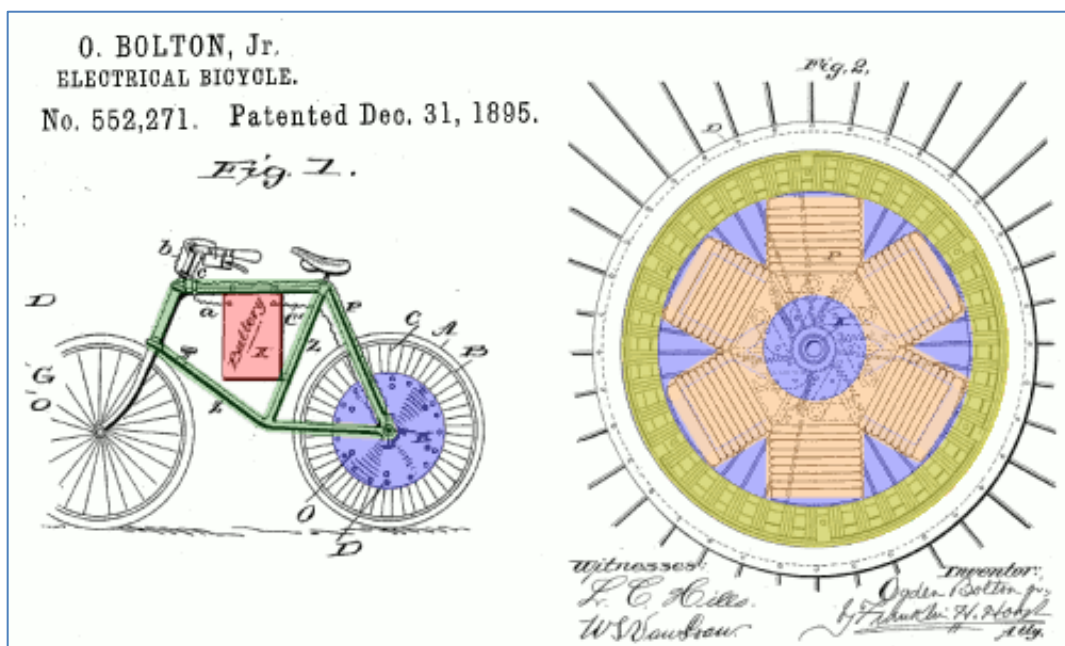


Figura 2: Primeira patente de uma bicicleta elétrica [4]

2.1.1. Potência necessária em aclives

Quando se está andando de bicicleta, às vezes, é preciso passar por certos caminhos em que a inclinação é acentuada e, na ausência de um bom preparo físico, não será possível concluir montado na bicicleta. Isso porque é necessário estar em velocidade para manter-se equilibrado e caso não alcance, deverá descer da bicicleta para evitar acidentes.

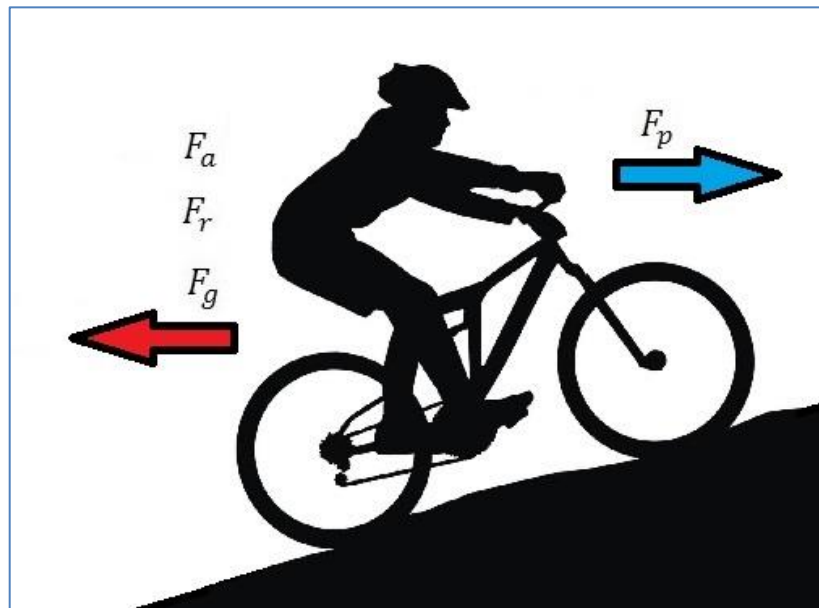


Figura 3: Forças atuantes [5].

Nas subidas, a massa total do conjunto é o que mais influencia no comportamento durante as subidas. Um aumento da massa total (veículo + passageiro) implica em um maior esforço e maior dispêndio de energia e ainda existe a força de atrito de rolagem, pois os pneus deformam. A força de atrito aerodinâmico também preocupa e depende de fatores como velocidade do vento, densidade do ar, posição do ciclista e, o principal, velocidade da bicicleta. [5]

Pela Figura (3), podemos obter 4 forças atuando simultaneamente:

- Propulsão [F_p]:

- $F_p = \frac{\eta * P}{V}$ (1)

- η é a eficiência da transmissão.

- P é a potência em watts.

- V é a velocidade da bicicleta em m/s.

- Aerodinâmica [F_a]
 - $F_a = K_a * (V + W)^2$ (2)
 - K_A é o fator de arrasto.
 - V é a velocidade da bicicleta em m/s.
 - W é a velocidade do vento em sentido contrário em m/s.
- Rolagem [F_r]
 - $Fr = Cr * m * g$ (3)
 - C_R é o Coeficiente de rolagem.
 - m é a massa do conjunto em kg.
 - g é a aceleração da gravidade em m/s².
- Gravidade [F_g]
 - $Fg = m * g * l$ (4)
 - m é a massa do conjunto em kg.
 - g é a aceleração da gravidade em m/s².
 - l é a inclinação ($\frac{\text{elevação}}{\text{distância percorrida}}$)

Magnani (2013) diz que “Quanto maior a inclinação (l), maior o esforço. Para se ter uma ideia, uma subida normal tem inclinação de 3:100 (3 m de elevação para cada 100 m rodados), uma subida difícil 6:100 e uma serra inclinada 12:100” [5]. Todas essas forças precisam estar equilibradas com a propulsão [F_p], força que o ciclista aplica, chegando à equação diferencial da força resultante:

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{\eta P}{V} - K_A(V + W)^2 - C_R mg - mgl \quad (5)$$

O uso da fórmula (5) permite cálculos para algumas situações tais como: percorrer um terreno plano, subida leve, média e acentuada, assim como a potência total necessária para completar os acíves usando auxílio do motor elétrico, como mostram-se nas Figuras 4 e 5, a seguir:

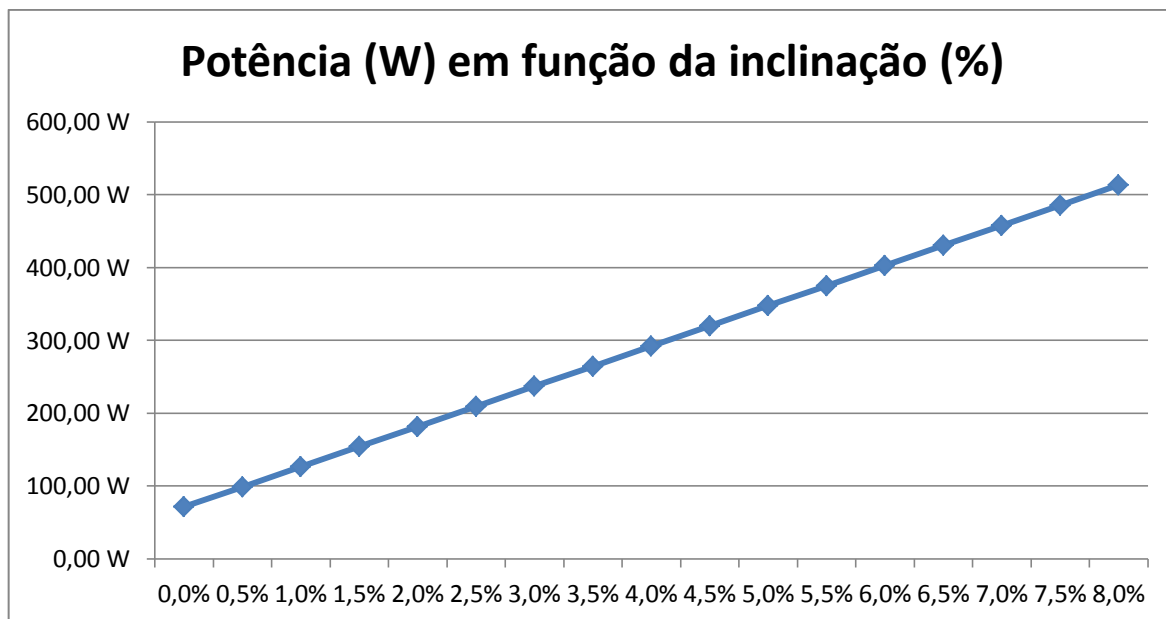


Figura 4: Gráfico de potência necessária em função da inclinação, com uma velocidade de cruzeiro de 15km/h.

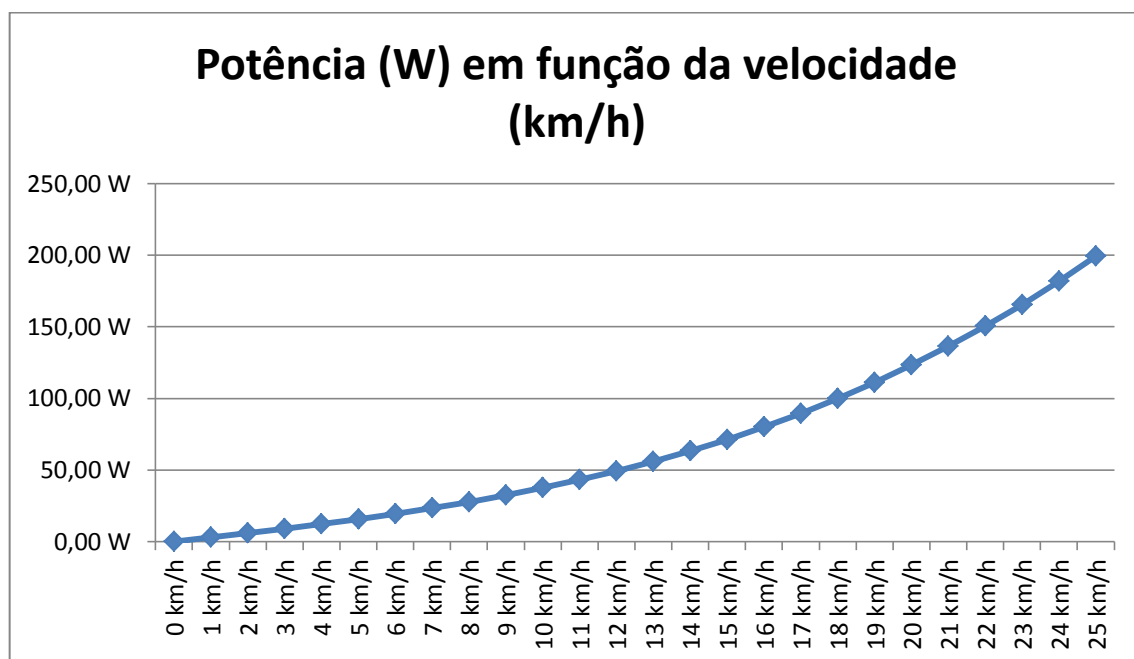


Figura 5: Gráfico de potência necessária em função da velocidade, com inclinação de 0%.

Dados utilizados para aproximação da potência necessária de propulsão:

- Peso total aproximado do conjunto: 108 kg
 - ciclista: 75 kg
 - bicicleta: 15 kg
 - baterias: 11,1 kg
 - motor: 5,7 kg
 - fiação e acessórios: 1,2 kg
- Coeficiente aerodinâmico 0,3 (pessoa em posição normal)
- Vento contrário: 0 km/h
- Coeficiente de rolagem: 0,008 (pneus de mountain bike)
- Gravidade: 9,82 m/s²
- Eficiência do conjunto: 80%
- Inclinação: variando de 0,0 a 8,0% (altíssima dificuldade) [Figura (4)].
- Velocidade média de cruzeiro: variando de 0 a 25 km/h [Figura (5)].

Tabela 1. Cálculo da potência necessária, variando a velocidade.

Velocidade (km/h)	Inclinação (%)	Potência (Watts)
0	0	0
5	0	15,73
10	0	37,50
15	0	71,32
20	0	123,22
25	0	199,24

Tabela 2. Cálculo da potência necessária, variando a inclinação e adotando velocidade de cruzeiro de 15 km/h.

Velocidade (km/h)	Inclinação (%)	Potência (Watts)
15	0	71,32
15	1	126,55
15	2	181,79
15	3	237,03
15	4	292,27
15	5	347,50
15	6	402,74
15	7	457,98
15	8	513,22

2.2. MOTORES ELÉTRICOS

Ned Mohan, (2014), diz que os acionamentos de motores elétricos representam uma importante área de aplicação de eletrônica de potência, com um valor de mercado de dezenas de bilhões de dólares anuais [6].

O motor elétrico é um equipamento capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica por isso é muito utilizado nas indústrias e transportes. São usados para fazer o inverso também, ou seja, transformar energia mecânica em elétrica, como é o caso, por exemplo, nas hidroelétricas e usinas eólicas.

Existem duas principais formas de classificar os motores elétricos, sendo elas, corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA).

Os motores CC utilizam as baterias como principal forma de alimentação, já os motores CA são comumente alimentados pela rede elétrica, que também é alternada.

Por se tratar de um veículo elétrico optou-se por realizar a alimentação através de um banco de baterias, pois são capazes de armazenar grandes quantidades de energia. Devido a essas características foi adotado o uso de um motor eficiente, que não precisa nem de inversores, nem escovas, pois é chaveado diretamente por um sistema de acionamento: o motor BLDC (Brushless Direct Current), que será explicado a seguir.

2.2.1. Motor corrente continua de ímãs permanentes

Motores de corrente contínua podem ser divididos em dois grupos, com escovas e sem escovas. O primeiro usa escovas como forma de comutação das bobinas. De acordo com a posição do comutador, ativa um conjunto de bobinas dando movimento ao rotor.

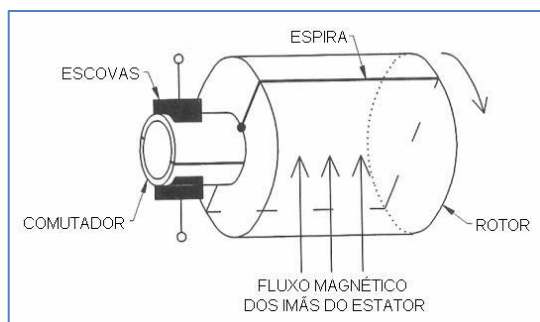


Figura 6: Motor CC elementar [7]

Segundo GIERAS; WING (2002), o motor sem escovas usa o mesmo princípio de comutação, porém eletrônico. Ele faz o acionamento das fases de acordo com a posição instantânea do rotor. E apenas duas fases são energizadas por vez. Por isso eles são chamados de Motores de corrente contínua sem escovas, Brushless Direct Current Motors (BLDC), outro nome bastante utilizado é Motor de Sincronização Autocontrolada, Self-Controlled Synchronization Motor (SCSM). [8]



Figura 7: Vista interna do motor BLDC (Autor)

De acordo com ARAÚJO (2012), o *BLDC* é considerado um motor síncrono, pois “o campo magnético do rotor e o próprio rotor giram em sincronismo com o campo magnético produzido pelo estator, ou seja, todos rodam à mesma frequência”. [9]

A posição instantânea de acionamento do motor é adquirida principalmente por sensores do tipo *Hall*, que são colocados na estrutura interna do motor, assim, fazendo o correto acionamento correto das fases.

O motor, já adquirido, de 36 volts possui 350 watts de potência, fazendo percorrer uma corrente média de 9,7 ampères quando em regime permanente em potência máxima. Possui 46 magnetos com polaridades alternadas e 51 enrolamentos divididos em três fases.



Figura 8: Sensores do tipo *Hall* posicionados dentro do motor BLDC (Autor)

2.3. SENSOR HALL

Rezende (2004) diz que: “Se um campo magnético estático é aplicado numa barra de semicondutor, perpendicularmente à direção de movimento de deriva das cargas, estas tendem a ser defletidas lateralmente, criando um acúmulo de cargas que resultam numa diferença de potencial transversal à barra”. [10]

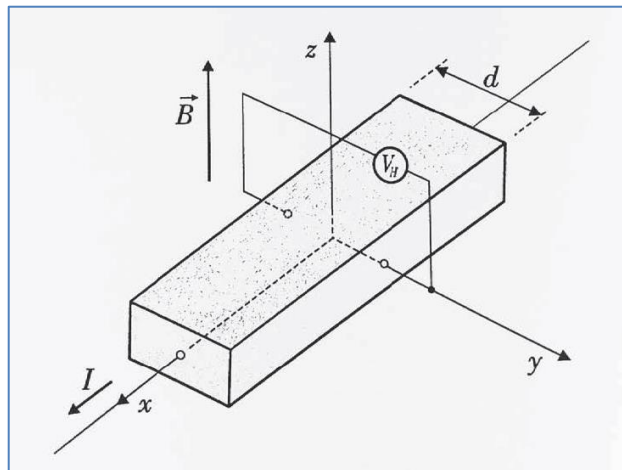


Figura 9: Efeito *Hall* num semicondutor [10].

E ainda completa: “O aparecimento deste campo elétrico transversal é conhecido como o efeito *Hall*, em homenagem a E.H. Hall que observou o fenômeno em condutores em 1879.” De acordo com a Figura 9 a tensão transversal (V_H) que aparece na barra é chamada de tensão *Hall*, o ϵ_y é a permissividade e d é a largura da barra”. [10]

$$V_H = \epsilon y * d \quad (6)$$

O motor utilizado no projeto possui três sensores *hall* e ímãs internos que indicam a posição atual, com isso é possível acionar as fases para a próxima posição do ciclo elétrico, dando movimento ao eixo de rotação quando o algoritmo é acionado sucessivamente.

2.4. TRANSISTOR MOSFET

Segundo Rezende (2004), o Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) é de importância tecnológica muito maior que o transistor de junção bipolar. [10]

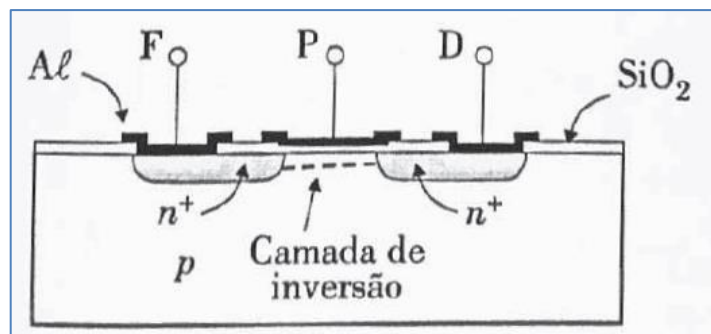


Figura 10: Estrutura plana de MOSFET de canal N [10].

Neste transistor o controle da corrente no canal é feito por meio do campo num capacitor formado pelo contato metálico da porta e pelo semicondutor do canal, separados por uma camada isolante. [10] Ou seja, aplica-se uma tensão na porta, em relação à fonte, para acionar o transistor. Em que nos MOSFETs tipo P, essa tensão é negativa. E nos MOSFETs tipo N, a tensão é positiva.

A ponte trifásica usada para o acionamento do motor inicialmente utilizava transistores MOSFET de alta potência, IRF9540, que possui canal tipo P, e o IRF540, que possui canal do tipo N. Devido à corrente que era demandada, esses transistores se mostravam pouco eficientes, provocando excesso de aquecimento, ou seja, dissipavam muito calor, que é um desperdício. Por esse motivo eles foram substituídos pelos MOSFETs IRF4905 (tipo P) e IRF3205 (tipo N), que conseguem controlar correntes de até 74 e 75 ampères de forma contínua, respectivamente. [11], [12], [13] e [14]. Eles foram escolhidos devido à capacidade de acionamento de corrente, tempo de chaveamento e baixa potência dissipada em forma de calor.

2.5 TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR (TJB)

O TJB é um dispositivo de três terminais: a Base, o Emissor e o Coletor. O nome bipolar vem do transporte da carga se efetuar por dois portadores, elétrons e lacunas. Existem essencialmente dois tipos de TJB, o do tipo NPN e PNP [15]:

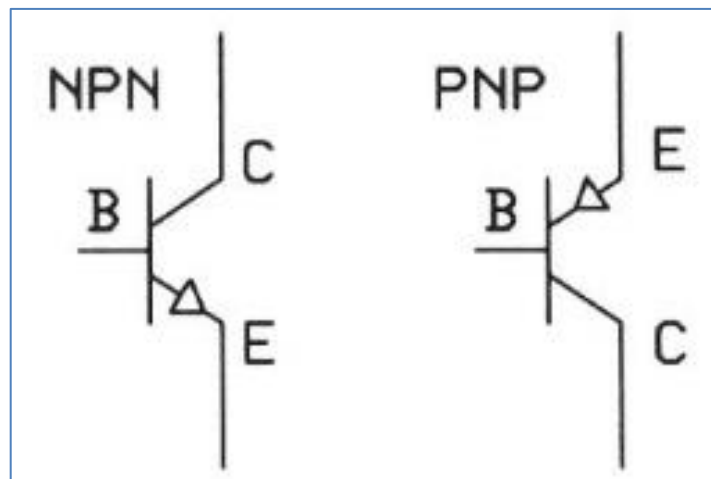


Figura 11: Transistores NPN e PNP [15].

2.6. OPTOACOPLADOR

São componentes de proteção, que isolam eletricamente as partes de um circuito. Possui, de um lado, um diodo emissor de luz (Light Emitting Diode, LED) e do outro um fototransistor ou um fotodiodo que ao receber os fótons, passa a conduzir corrente elétrica. Na Figura 12, mostram-se um optoacoplador na sua forma comercial e o seu princípio de funcionamento. Foi escolhido devido ao baixo tempo de comutação e capacidade de corrente.

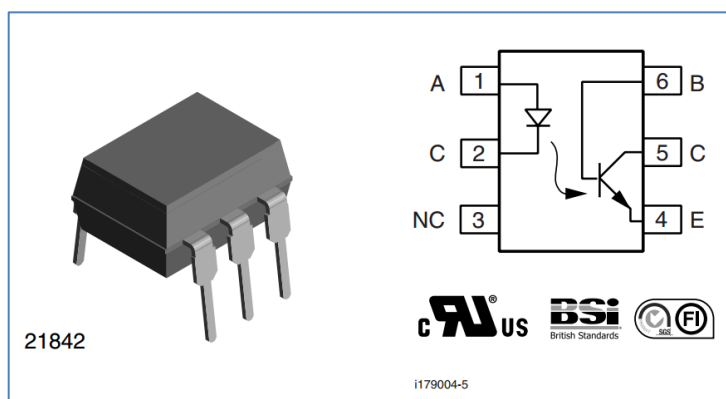


Figura 12: Optoacoplador 4N25 [16].

2.7. MICROCONTROLADOR

Segundo Melo:

Um Microcontrolador é um sistema computacional completo inserido em um único circuito integrado. Possui CPU (*Central Processing Unit*), memória de dados RAM (*Random Access Memory*) e programa ROM (*Read Only Memory*) para manipulação de dados e armazenamento de instruções, sistema de clock para dar sequência às atividades da CPU, portas de *Input/Output* (I/O), além de outros possíveis periféricos como, módulos de temporização, conversores analógico digital e até mesmo nos mais avançados conversores USB (*Universal Serial Bus*) ou ETHERNET. (2011, p.1-2). [17]

Para funcionar corretamente, o microcontrolador precisa ser programado com as funções desejadas, ativando seus registradores e definindo as variáveis na memória. Existem sistemas usados para editar, compilar e enviar o *software* para a memória de cada microcontrolador. De acordo com a programação, o microcontrolador recebe os dados, vindo dos sensores externos (*inputs*) e internos, efetua os cálculos e envia os comandos para as saídas (*outputs*).



Figura 13: Circuito integrado do microcontrolador ATmega328P-PU (autor).

2.8. BATERIA CHUMBO/ÁCIDO

É o objeto onde fica armazenada toda a energia do sistema na forma de energia química, contendo chumbo, dióxido de chumbo e ácido sulfúrico aquoso.

Segundo Bocchi, Ferracin e Biaggio, quando a bateria descarrega, de acordo com a demanda por energia elétrica, o ácido sulfúrico é consumido, produzindo sulfato de chumbo e água. A diferença de potencial entre os terminais da bateria em circuito aberto é proporcional à temperatura e à concentração de ácido sulfúrico no eletrólito. [18]

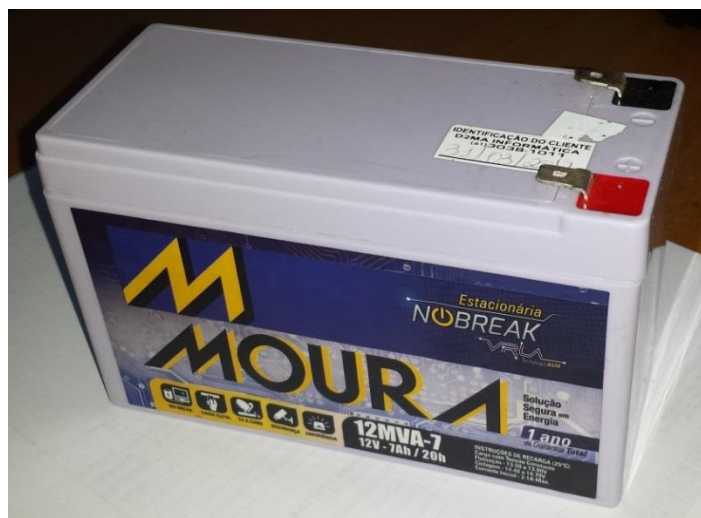


Figura 14: Bateria chumbo-ácida selada (Autor).

2.8.1. Capacidade da bateria

Karasinski e Dias [19] dizem que a capacidade de um acumulador é a quantidade de energia elétrica que pode ser obtida através da reação química que ocorre no interior. A medida Ampère-Hora (Ah) é feita a partir do produto de uma descarga constante de corrente pelo tempo marcado desde o início, a plena carga, até um valor predeterminado de tensão mínima, conforme a equação abaixo:

$$\text{Capacidade de descarga}_{(Ah)} = \text{Corrente}_{(A)} * \text{tempo de descarga}_{(h)} \quad (7)$$

As baterias convencionais são, normalmente, ensaiadas no regime C_{10} ou C_{20} , que são descargas em 10 ou 20 horas respectivamente. Por isso é necessário especificar o regime de descarga em que a bateria foi submetida. Por exemplo, no regime C_{20} uma bateria que fornece 5A durante 20 horas, entrega 100Ah ($5A \times 20h = 100Ah$).

2.8.2. Autonomia aproximada

A autonomia é diretamente proporcional à capacidade da bateria e inversamente à demanda por potência. Para calcular, é necessário ter a curva de descarga da bateria. Como exemplo, foi utilizada a tabela de descarga em corrente constante, disponibilizada pelo fabricante da bateria Moura 12MVA-7, foi possível obter a curva aproximada do tempo em função da corrente de descarga da bateria em questão, até que a tensão atinja o mínimo de 1,75V por célula, sendo que a bateria possui 6 células, ficando com 10,5V. No projeto serão adquiridas três baterias deste modelo, o que perfaz 36V nominais e será considerada descarregada quando atingir 31,5V, que também será o limite para que o sistema funcione. [20]

Tabela 3. Corrente constante de descarga em Ampères (25°C) da Moura 12MVA-7 obtida no *datasheet* descarregando até a tensão 1,75V por célula. [20]

Regime	C1	C5	C10	C20
Capacidade Nominal (Ah)	4,53	6,35	6,5	7

A partir dos dados da tabela 3 e realizando interações no Scilab de modo que o Erro Quadrático Médio Total fosse minimizado, foi obtida a fórmula para cálculo da curva dessa bateria:

$$Tempo = 6,2725841 * (I^{-1,10389}) \quad (8)$$

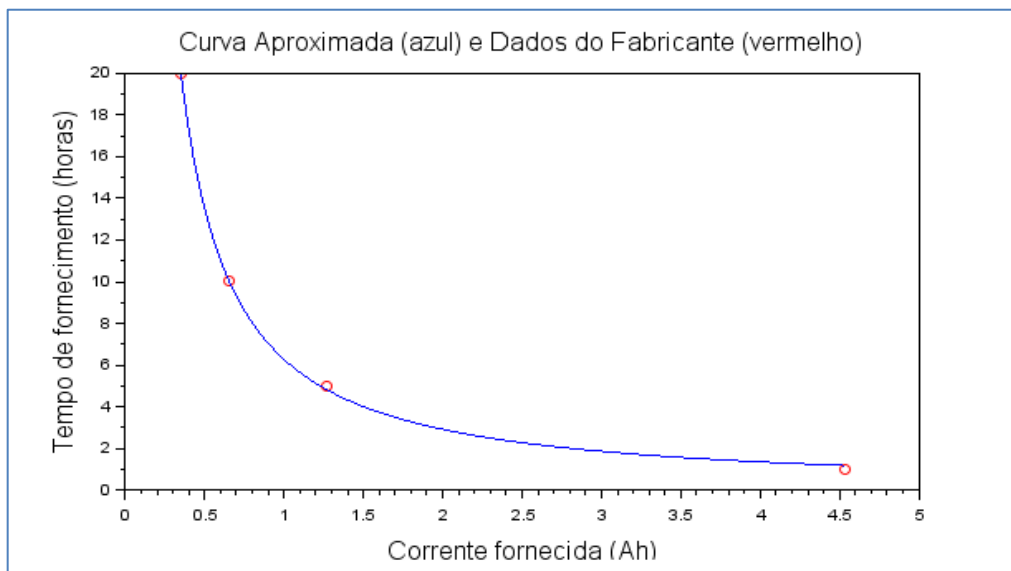


Figura 15: Gráfico exemplo da curva aproximada do tempo de descarga (Autor)

A corrente I está em função da potência P solicitada pelo motor, que possui uma eficiência de aproximadamente 80%. Adotando uma inclinação de 1% (leve) e variando a velocidade de cruzeiro até 25km/h, o gráfico a seguir mostrará a estimativa de autonomia utilizando-se apenas da potência do motor, ou seja, sem ajuda do ciclista.

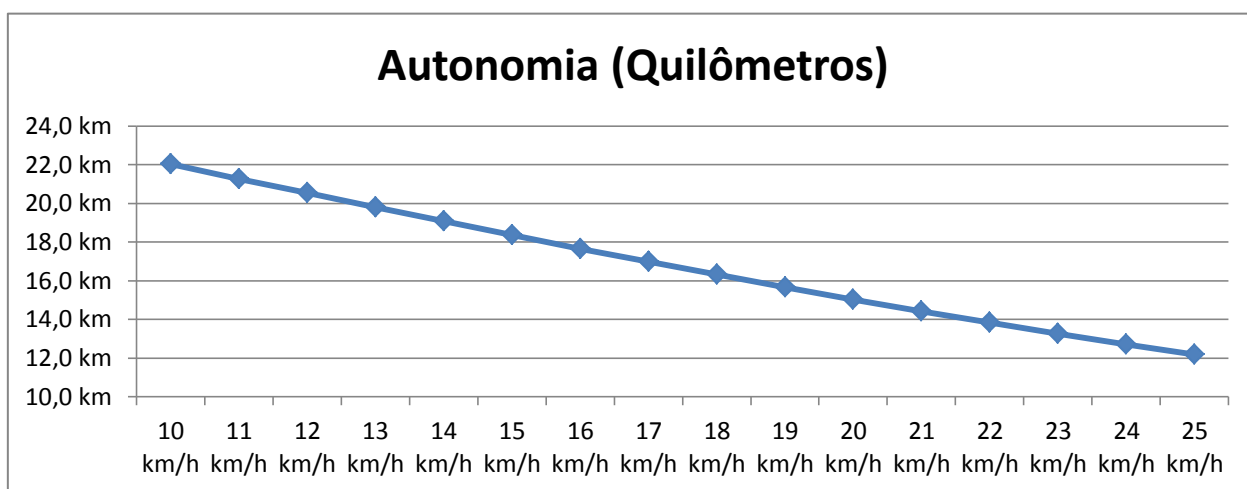


Figura 16: Gráfico da autonomia em função da velocidade (Autor)

A seguir, gráficos de autonomia, em horas e minutos, em função da potência exigida do motor:

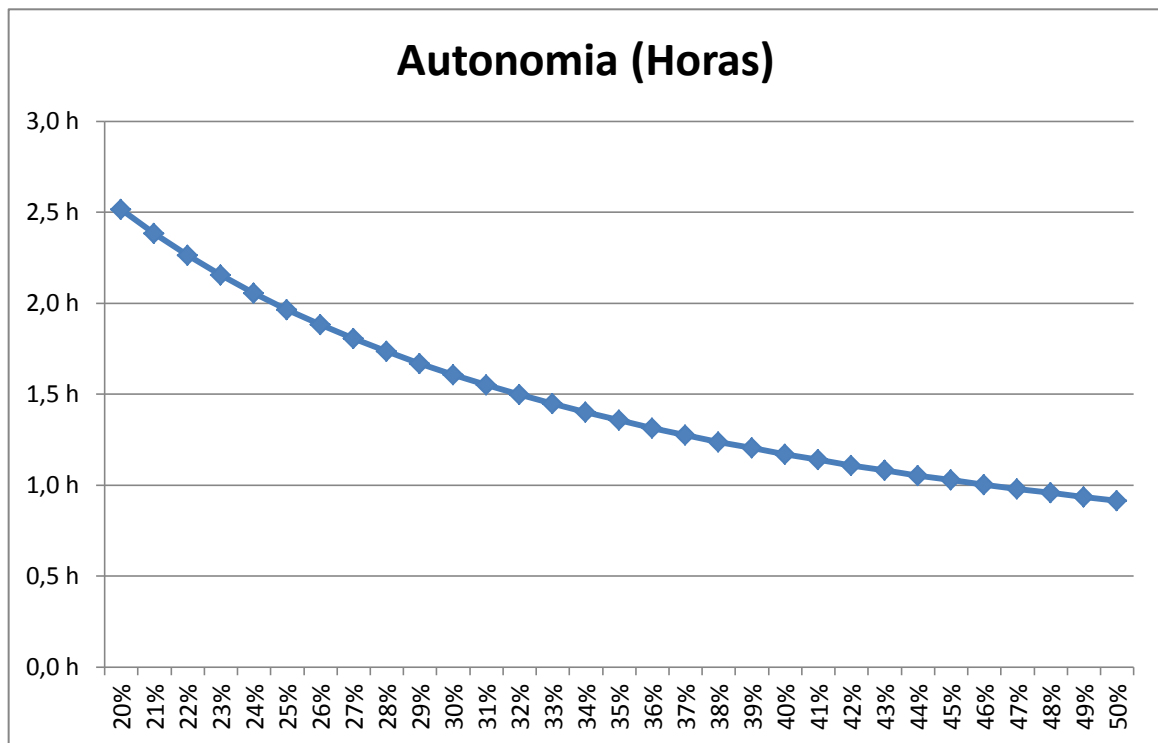


Figura 17: Gráfico da autonomia em função da demanda por potência < 50% (Autor)

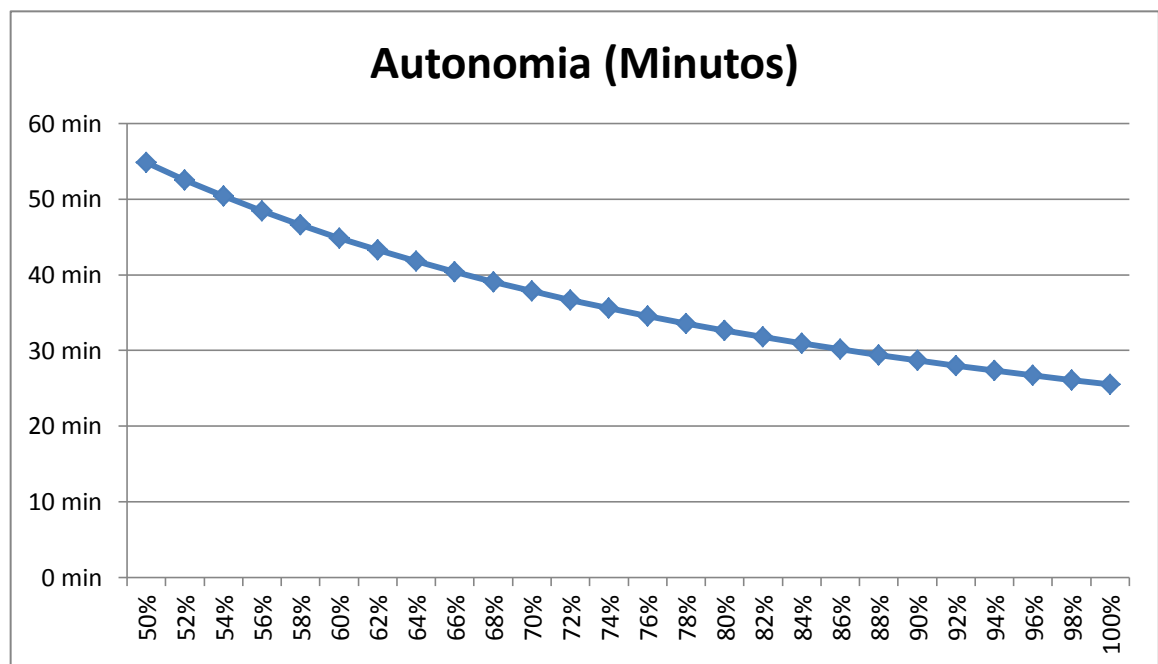


Figura 18: Gráfico da autonomia em função da demanda por potência > 50% (Autor)

3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em quatro partes, pesquisa de mercado, definição dos subsistemas, diagramação/simulação dos circuitos e validação.

A pesquisa de mercado nos mostrará uma estimativa dos custos do projeto e será usada para realizar a divisão dos subsistemas e diagrama de blocos, pois os componentes são vendidos em kits ao consumidor final que deseja montar o próprio conjunto. Depois de definidos os subsistemas, será feito um estudo a fim de selecionar quais componentes deverão ser empregados nas respectivas funções.

Definidos os componentes, serão obtidos suas características e parâmetros através das fichas técnicas ou através de testes em bancada para que seja possível completar as simulações dos circuitos e posterior validação.

A validação deve confirmar os circuitos e algoritmos propostos e/ou sugerir alterações dos mesmos, ponderando a eficiência e baixo custo.

3.1. PESQUISA DE MERCADO

A página online de artigos sobre bicicletas PEDAL diz que de acordo com uma estimativa feita em 2008, é possível afirmar que o Brasil ocupa o quinto lugar no ranking global de consumo de bicicletas com mais de 5,5 milhões de unidades, estando à frente de países tradicionais como a Alemanha, França e Inglaterra na época em que foi feita a pesquisa. [21]

Tomando-se por base os dados supracitados, pode-se estimar que esses números sejam apenas uma demonstração do que o Brasil representa atualmente e até mesmo do que poderá vir a representar num futuro promissor. Vale ressaltar que todo esse sucesso se deve ao fato de sermos um País com elevado número de bicicletas. Em virtude disso, o Brasil conta com a Bike Expo Brasil, consolidada como a maior feira de bicicletas da América do Sul. Realizada desde 2006 teve sua última edição realizada em 2012, sempre destinada exclusivamente ao setor, reunindo as marcas líderes no segmento. [22]

Em 2009 a Bike Expo Brasil trouxe como grande novidade as bicicletas elétricas, representando uma evolução no conceito de mobilidade urbana por bicicletas, expandindo o limiar de utilização de uma bicicleta comum. Expôs diversos lançamentos onde diferentes marcas apostavam neste segmento que viria para ficar. Havia bicicletas elétricas de grife, como a italiana *Ducati*, várias opções de fabricantes e fornecedores chineses e a então recém-chegada *Kasinski*, brasileira consolidada no setor de motos que naquele momento entrava no mercado das bicicletas elétricas. [23]

A *Bike Magazine* mostrou que ideia de usar um motor elétrico numa bicicleta é bem antiga, e na Grã-Bretanha a lei que regulamenta esse setor data de 1983. Em alguns relatos verificou-se que a marca *Specialized* foi a pioneira em trazer a bicicleta elétrica para o Brasil. Alguns modelos foram apresentados num evento fechado em 1990 para 15 convidados, que contou com a presença do campeão mundial, *Ned Overend* no *Zoom Bike Park*, em Campos do Jordão. [24]

As bicicletas elétricas desembarcaram com maior força no Brasil em 2009, entretanto as vendas apresentaram crescimento em 2011, onde a alta se deu principalmente no Rio de Janeiro, afirma Claudio Beda, da *Easy Biking*, que esgotou todo o estoque no fim de 2011. [24]



Figura 19: Bicicleta elétrica tração traseira [25]

A expansão das ciclovias e ciclofaixas Brasil afora também alavancou as vendas das bicicletas elétricas, e hoje encontra-se bicicletas elétricas de diversos valores. As marcas mais comuns são: LEV (*Light Electric Vehicles* - Veículos Elétricos Leves), *Evolubike*, *General Wings*, *Ecostar*, *Go Easy*, *Blitz*, *WindBikes* e Bicimoto. Outras empresas reforçam o segmento, como a fabricante de motocicletas Kasinski, que vai ampliar seus modelos. [24]

Segundo um *review* feito por SOUZA da Tecmundo, a LEV é uma empresa carioca que pode ser considerada pioneira na fabricação e comercialização de bicicletas elétricas aqui no Brasil. Foi também em 2009 que a sua primeira bicicleta elétrica entrou para a comercialização. Dispõe de alguns modelos iniciando em R\$3.990,00 e variando até R\$5.590,00. Um exemplo é a E-bike vendida a R\$3.990,00 que possui estrutura de aço carbono, motor de 350W, bateria 36V/12Ah e com opções de pedal assistido ou acelerador, sem contar acessórios como buzina e cesta. [26]

Observando sites de vendas, outra opção explorada pelas empresas é a venda de kits elétricos em que o próprio cliente faz a adaptação na bicicleta. Esses kits variam em potência do motor, capacidade da bateria e acessórios. Para comparação com o presente projeto, foi feita uma pesquisa por kits com potência de 350W, acelerador, display e sem bateria (já que preço varia de acordo com a capacidade). A média de preços foi de R\$990,00 até R\$1.790,00. Separados, os carregadores para baterias de 36V/12Ah custam em média R\$200,00 e os controladores para motores de 350W ficam em torno de R\$250,00. Valores atualizados em novembro de 2016.



Figura 20: Controlador genérico para bicicletas elétricas [27]

3.2 SUBSISTEMAS

Os subsistemas foram divididos de modo a facilitar a definição dos algoritmos, seleção dos componentes e escolha dos parâmetros de programação.

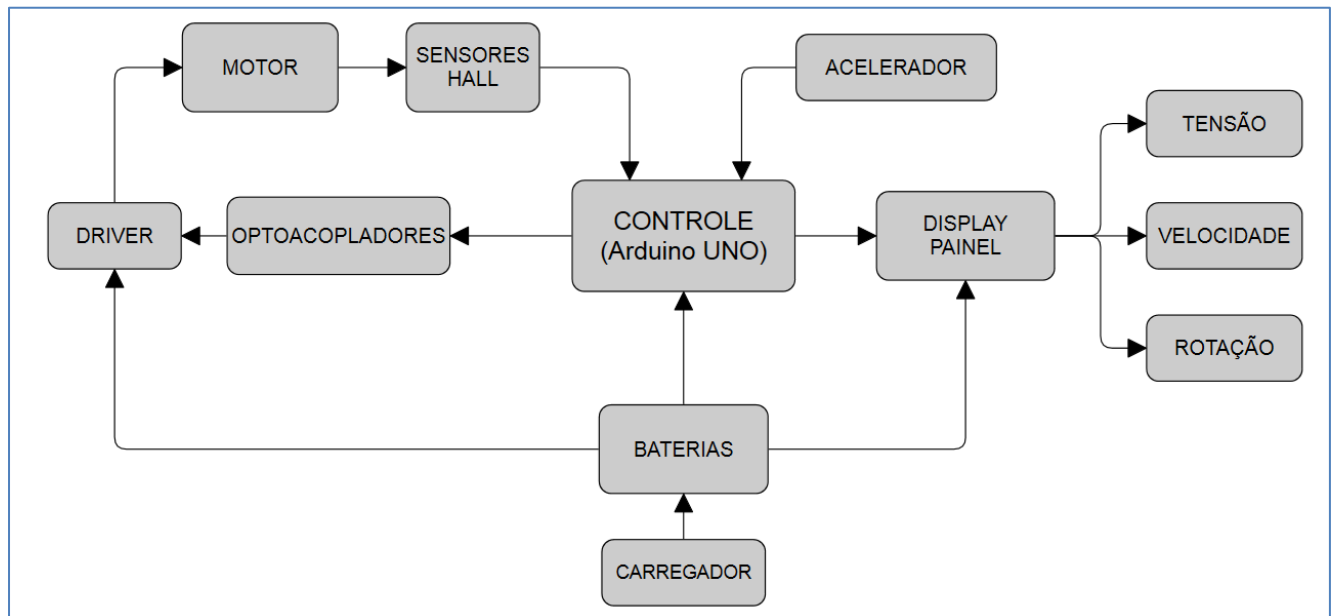


Figura 21: Fluxograma do sistema (Autor)

A partir do fluxograma (Fig. 21), os subsistemas foram divididos por suas funções principais.

- ✓ Subsistema de interface com o usuário: Acelerador e Display/Painel que possui informações de tensão, velocidade e rotação.
- ✓ Subsistema de Potência: Optoacopladores e driver de potência.
- ✓ Subsistema motor e sensores *Hall*: Motor BLDC e sensores *Hall* para obter a posição instantânea do motor.
- ✓ Subsistema de controle: Onde é realizado todo processamento das informações obtidas pelos sensores.
- ✓ Subsistema de carregamento do banco de baterias: Carregador com algoritmo para preservar a vida útil da bateria.

3.2.1. Subsistema de interface com o usuário

A interface com o usuário será feita a partir de um display de cristal líquido, Liquid Crystal Display (LCD), onde serão mostradas informações como velocidade, rotações por minuto e tensão da bateria. Além disso, contará com um acelerador que converte a posição do sensor em tensão. Essa tensão é enviada ao sistema de controle e é calculada a demanda de potência.



Figura 22: Display de cristal líquido (Autor)

O tacômetro informa as rotações por minuto (RPM), enquanto o velocímetro é o instrumento que vai informar a velocidade atual da bicicleta. As RPM são obtidas através da comutação dos sensores *hall*, localizados dentro do motor, que comutam de nível lógico baixo para alto 23 vezes a cada volta completa. Eles fazem isso devido aos ímãs permanentes localizados dentro do motor.

Para cálculo das RPM, é medido o período entre duas comutações e dividido por 23, transformado em rotações por minuto para depois ser calculada a velocidade, conforme equações (8) e (9).

$$\text{RPM} = \frac{1}{T} * \frac{60}{23} \quad (9)$$

$$\text{Velocidade}_{(\text{km/h})} = \text{RPM} * 2 * \pi * \text{raio da roda} \quad (10)$$

3.2.2. Subsistema de potência

A demanda por potência é obtida no subsistema de controle e enviada ao *driver* do motor na forma modulada por largura de pulso (Pulse Width Modulation - PWM), passando primeiramente por optoacopladores a fim de proteger o subsistema de controle que ficará isolado eletricamente.

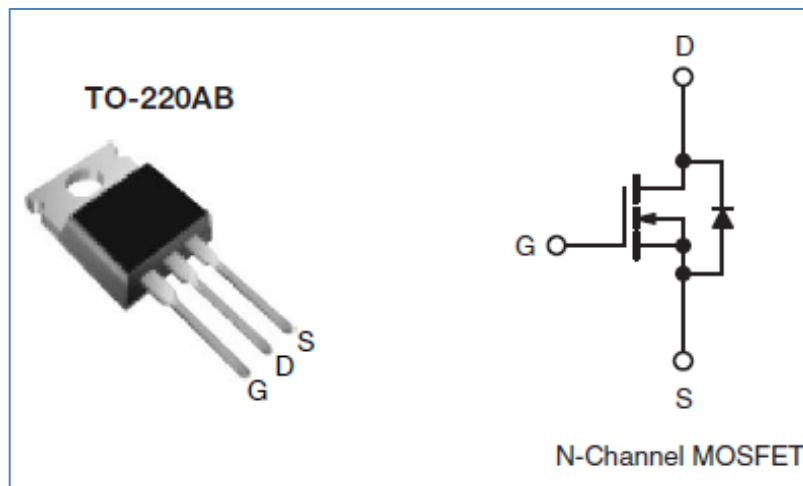


Figura 23: MOSFET Canal-N [XX]

O *driver* é formado por uma ponte trifásica, que são MOSFETs dispostos de maneira que realizem o correto acionamento das fases do motor a partir dos sinais de comando vindo dos optoacopladores.

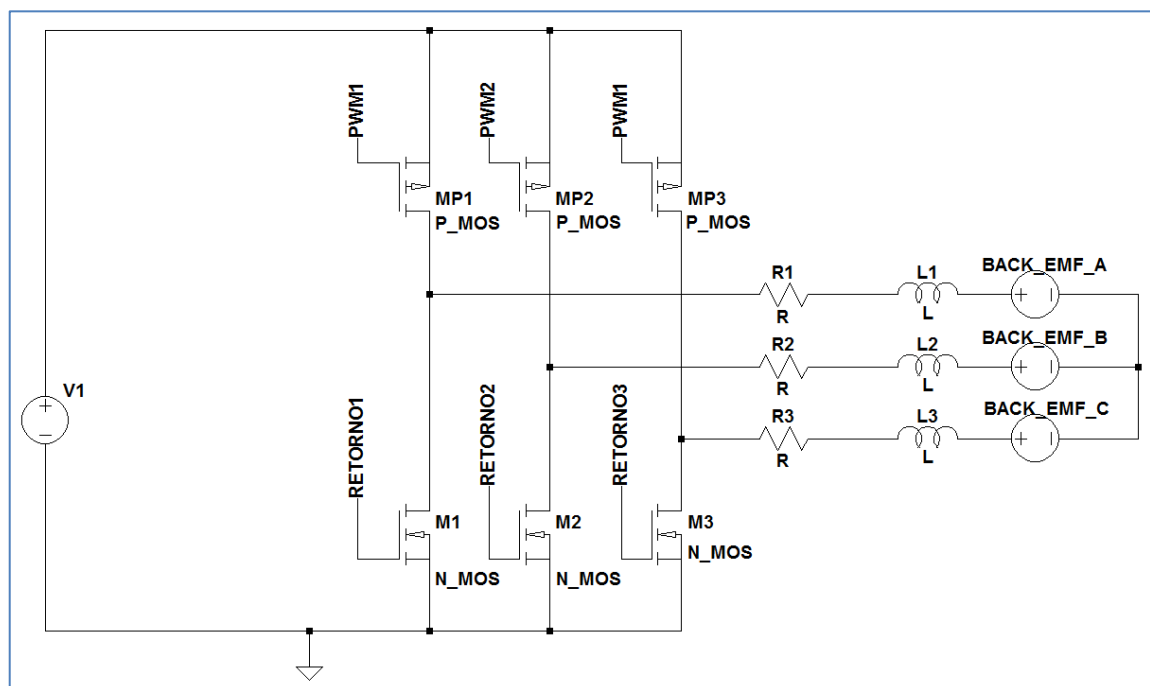


Figura 24: Ponte trifásica de acionamento (Autor)

3.2.3. Subsistema motor e sensores *Hall*

Esse subsistema é o responsável por converter a energia elétrica em mecânica e enviar, por meio dos sensores *Hall*, as informações da posição atual do motor para o subsistema de controle.



Figura 25: Motor com sensores *Hall* acoplados internamente (Autor)

O motor deve funcionar de modo que o *ripple* de torque não seja sentido pelo usuário, para isso as comutações das fases devem ser precisas e exatas. *Ripple* de torque são os picos de torque no motor, fazendo com que a bicicleta produza pequenos trancos ou vibrações.

Usando o arduino, foi elaborado um algoritmo que contou 24 ciclos elétricos realizados para o motor completar uma volta. Em cada ciclo ocorrem seis transições de estados em relação à posição do motor, conforme a Tabela 4, obtida a partir da leitura dos sensores e teste prático das fases para saber qual deveria ser ativada, resultando em 144 comutações por volta (CPV).

Tabela 4. Ordem de chaveamento para cada fase do motor de acordo com a posição obtida pelos sensores *Hall*.

Sensores <i>Hall</i> (X/Y/Z)	Transistores que devem ser ativados:	
	PWM	Retorno
0/0/1	C	B
0/1/1	C	A
0/1/0	B	A
1/1/0	B	C
1/0/0	A	C
1/0/1	A	B

Os sensores *Hall* utilizados possuem o código 43AF. Para o correto funcionamento, é necessário o uso de resistores *pull-up* que são utilizados para evitar flutuação em pinos configurados como entradas (*input*), ou seja, irão assegurar que o pino esteja em um estado alto usando uma pequena quantidade de corrente.

Para essas condições o resistor não pode ser de valor muito baixo, senão passará muita corrente para o pino de entrada. O resistor não pode ser de valor muito alto, caso contrário não passará corrente suficiente para o pino de entrada e afetará na velocidade de transmissão. [28]

O *datasheet* do sensor *Hall* S41, diz que um resistor *pull-up* de 10kOhms é suficiente, quando ligado a uma alimentação de 5V. [29]

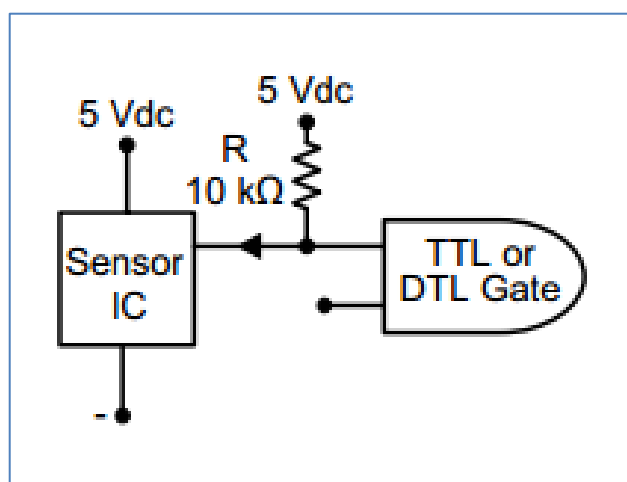


Figura 26: Esquemático para o resistor *pull-up* no sensor *Hall* [29]

3.2.4. Subsistema de controle

Onde ocorre todo o processamento dos dados analógicos e digitais vindos dos sensores, passando pelos algoritmos de controle e enviando as informações ao subsistema de potência e ao *display*, para interface com o usuário.



Figura 27: Arduino Uno (Autor)

O componente principal desse subsistema é o microcontrolador ATmega328P, incluso no Arduino Uno, que será utilizado no projeto durante as etapas de teste. [30]

As principais características são:

- ✓ Alta velocidade de processamento: até 16 MHz de clock.
- ✓ Memória interna de 32 KB.
- ✓ 14 entradas/saídas digitais.
- ✓ 06 entradas analógicas.
- ✓ 06 saídas PWM (dentre as 14 digitais).
- ✓ 2 entradas para interrupções.

3.2.5. Subsistema de carregamento das baterias

Um conjunto de três baterias 12V ligadas em série, será responsável por alimentar todo o sistema, são baterias chumbo ácidas seladas que não necessitam de manutenção. Colocadas em série, é obtida uma tensão equivalente a 36V, que é a tensão nominal do motor.

Para o carregamento a partir da rede, será projetado um conversor retificador CA-CC de onda completa e, posteriormente, um conversor abaixador de tensão do tipo Buck.

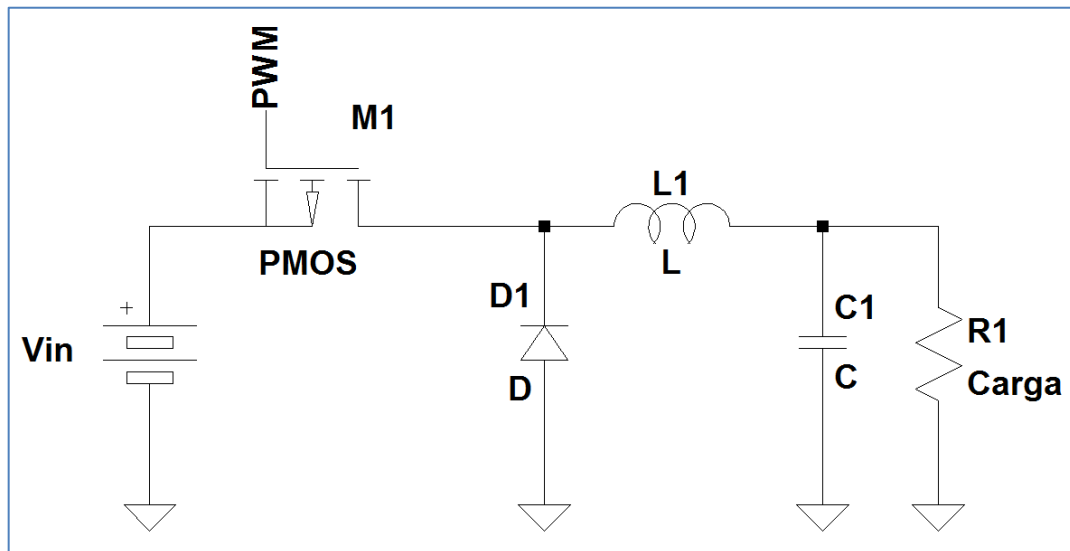


Figura 28: Exemplo circuito tipo *Buck* (Autor).

3.3. DIAGRAMAÇÃO E MONTAGEM DOS CIRCUITOS

Os circuitos e esquemáticos serão feitos nos simuladores Proteus e LTspice, divididos de acordo com seus subsistemas. Serão disponibilizados, também, os algoritmos utilizados.

Tabela 5. Nomenclatura de acordo com a cor dos fios oriundos do motor.

	Sensores <i>Hall</i>	Fases
Azul	X	A
Verde	Y	B
Amarelo	Z	C

3.3.1. Circuito optoacoplador e *driver*

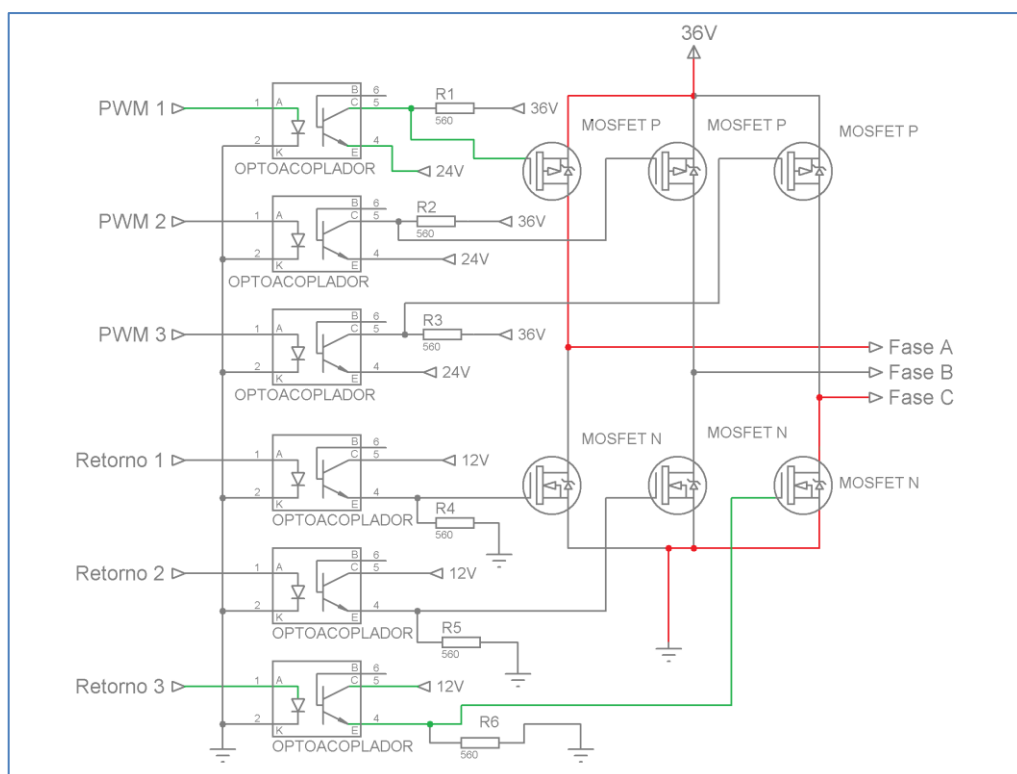


Figura 29: Diagrama do circuito optoacoplador e *driver*, com exemplo de acionamento das fases (Autor)

Para que os MOSFETs funcionem no modo chaveado, o tempo de carga e descarga do capacitor de Porta do transistor deve ser mínimo, garantindo que ele trabalhe a maior parte do tempo em modo chaveado, dissipando menos energia, ou seja, mais eficiente.

Esse circuito é conhecido por *Push-Pull*, e funciona utilizando 2 transistores, um NPN e um PNP, como na figura 30:

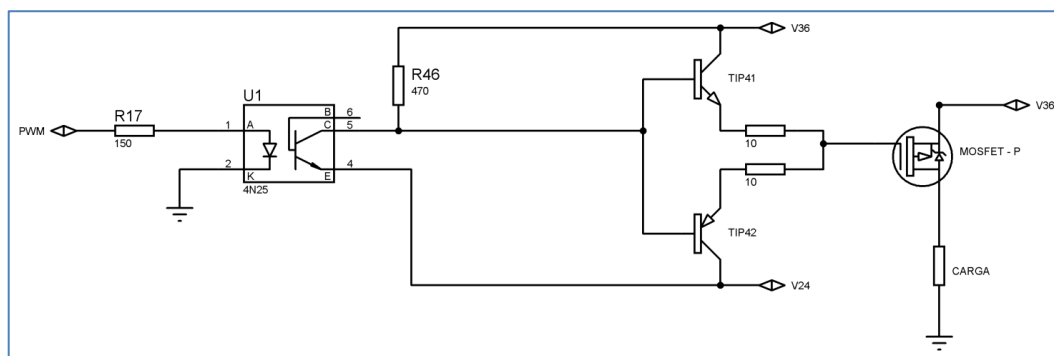


Figura 30: Circuito Push-Pull (Autor)

Com esse circuito, o tempo de resposta diminui. Mas pela adição de tantos componentes, foi feita uma análise de viabilidade, onde foram medidos os tempos de resposta sem o circuito *push-pull*, para concluir se seria necessária a adição do mesmo, levando em conta os tempos de acionamento das fases do motor.

Na bancada do laboratório, foram utilizados:

- Osciloscópio
- Gerador de funções
- Resistores
- Optoacoplador
- MOSFETs tipo P e N
- Bateria 12V

Foi montado o circuito de teste para o transistor tipo N conforme a figura 31, usando um PWM de 50%:

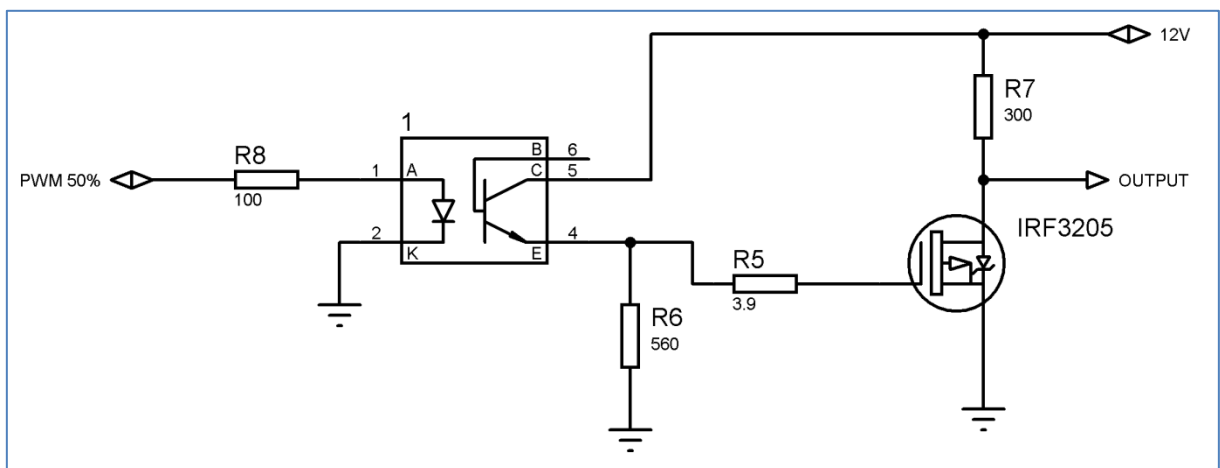


Figura 31: Circuito teste de resposta do transistor IRF3205

Este circuito da Figura 31 é o mesmo utilizado em cada MOSFET tipo N da ponte trifásica.

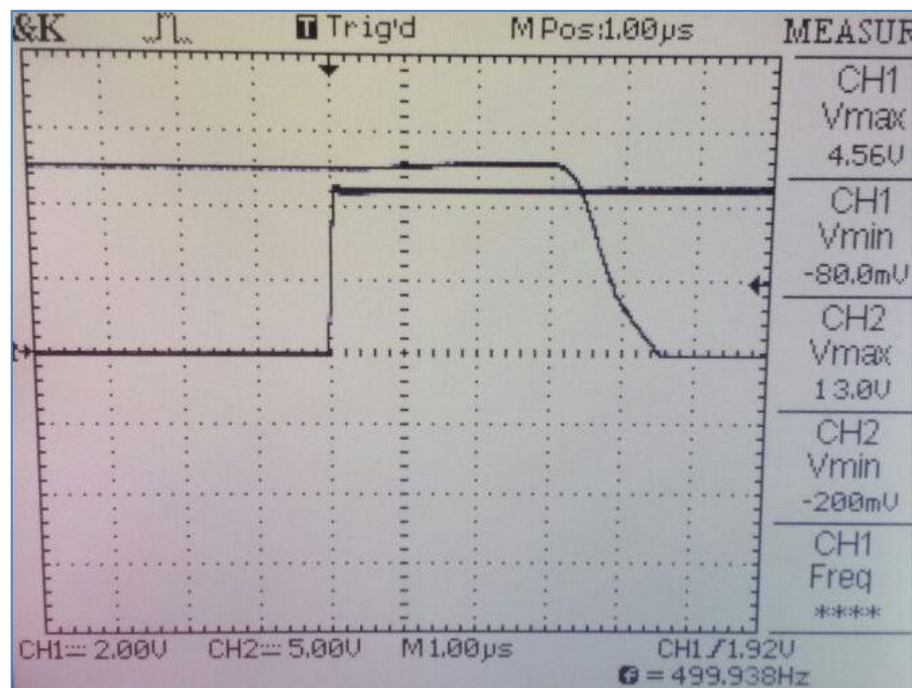


Figura 32: Transistor IRF3205 sendo ativado

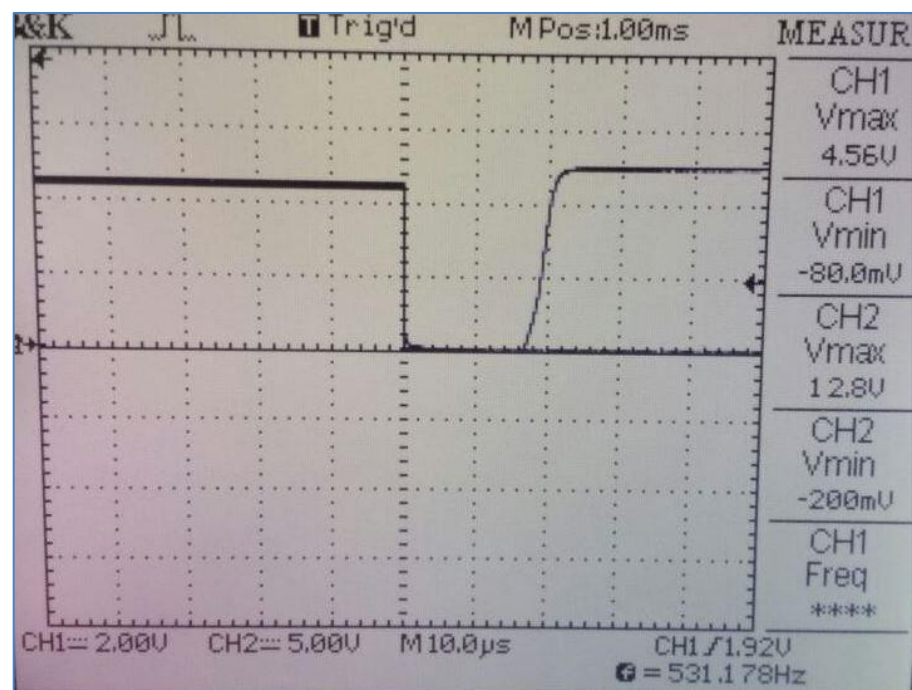


Figura 33: Transistor IRF3205 sendo desativado

Analisando o gráfico do osciloscópio, na Figura 32, percebe-se um tempo total de ativação de aproximadamente $4,5\mu\text{s}$. Agora, a partir da figura 33, com o transistor sendo desativado, pode-se concluir que o tempo de desligamento é de aproximadamente $22\mu\text{s}$. Para os transistores tipo N, esse tempo de comutação é totalmente aceitável, já que ele não irá realizar o acionamento por PWM.

Foi montado o circuito idêntico ao de cada MOSFET tipo P da ponte trifásica, para o teste do transistor tipo P, conforme a figura 34:

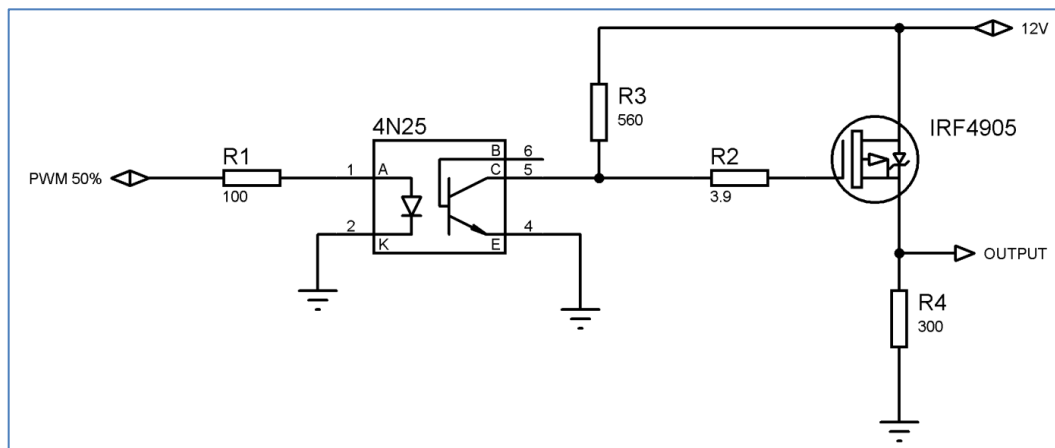


Figura 34: Circuito teste de resposta do transistor IRF4905

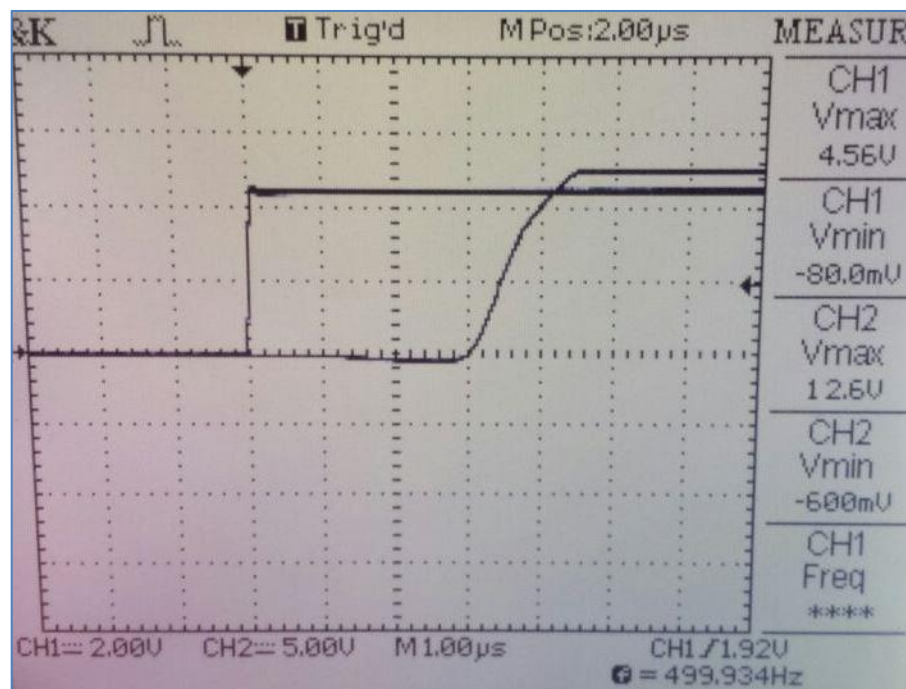


Figura 35: Transistor IRF4905 sendo ativado

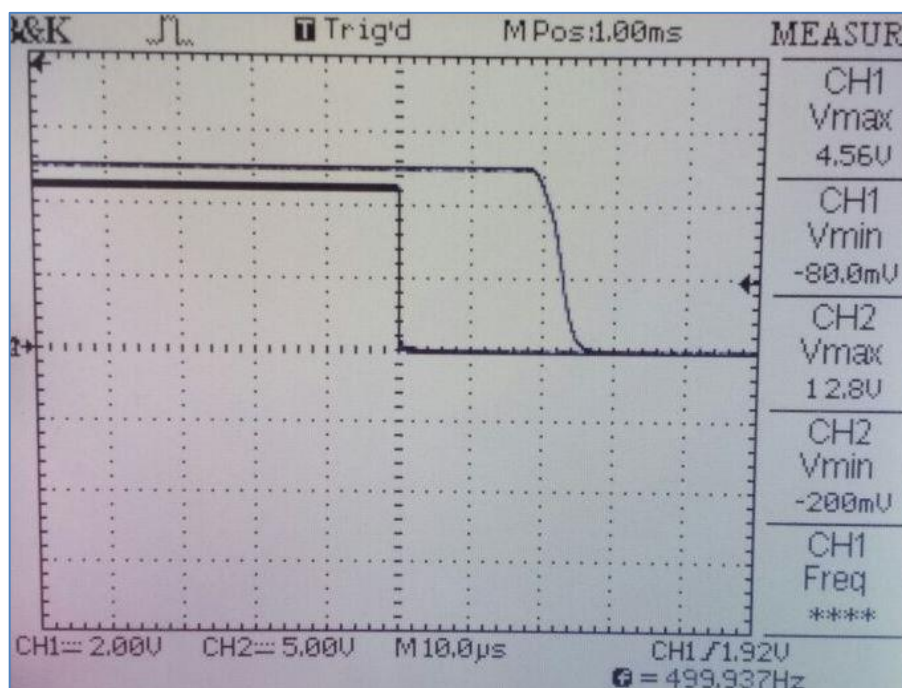


Figura 36: Transistor IRF4905 sendo desativado.

Foi observado que o chaveamento do transistor demora 4,5μs para ativar e 25μs para desativar, aproximadamente. O que é aceitável, comparado ao período de 256μs obtido da frequência de 3906,25 Hz do PWM que será utilizado. O período mínimo (T_{\min}) quando a rotação é máxima, foi calculado com base no RPM e no número de comutações por volta (CPV), em que “CPV” são as comutações realizadas pelos transistores para que o motor funcione:

$$T_{\min} = \frac{60}{RPM * CPV} \quad (11)$$

Considerando a velocidade máxima de 35km/h, a rotação do motor, em uma bicicleta aro 29, seria de 257 RPM, então:

$$T_{\min} = 1,62ms$$

Com esses resultados, foi concluído que não será preciso o uso do circuito *push-pull* mencionado anteriormente.

3.3.2. Circuito de controle e sensores

É o circuito que capta dos sensores *Hall* (X, Y, Z) a posição atual do motor e envia para o microcontrolador. Foram usados os resistores pull-up como descrito na Figura 26 e conectados nas respectivas entradas digitais do microcontrolador.

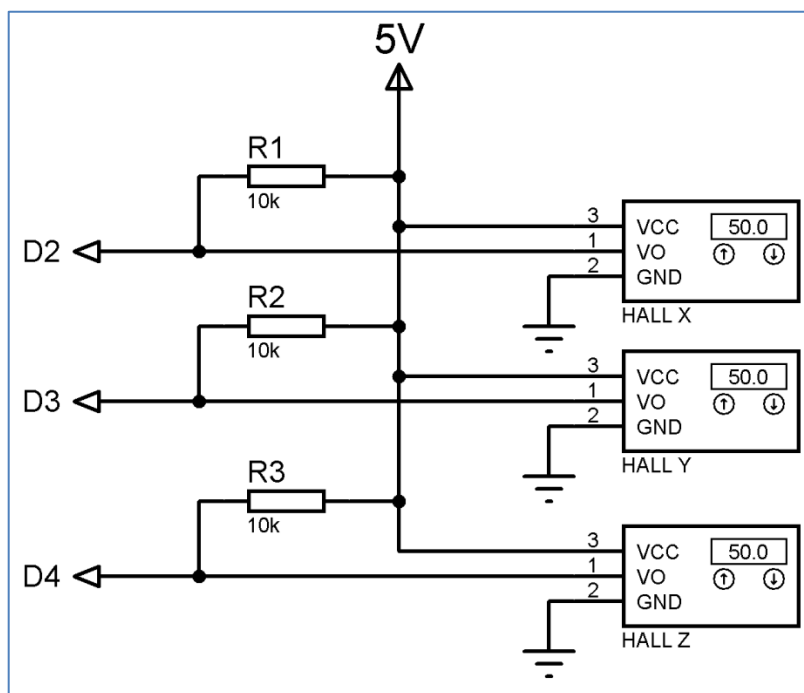


Figura 37: Diagrama do circuito de obtenção de dados (Autor)

3.3.3. Circuito carregador

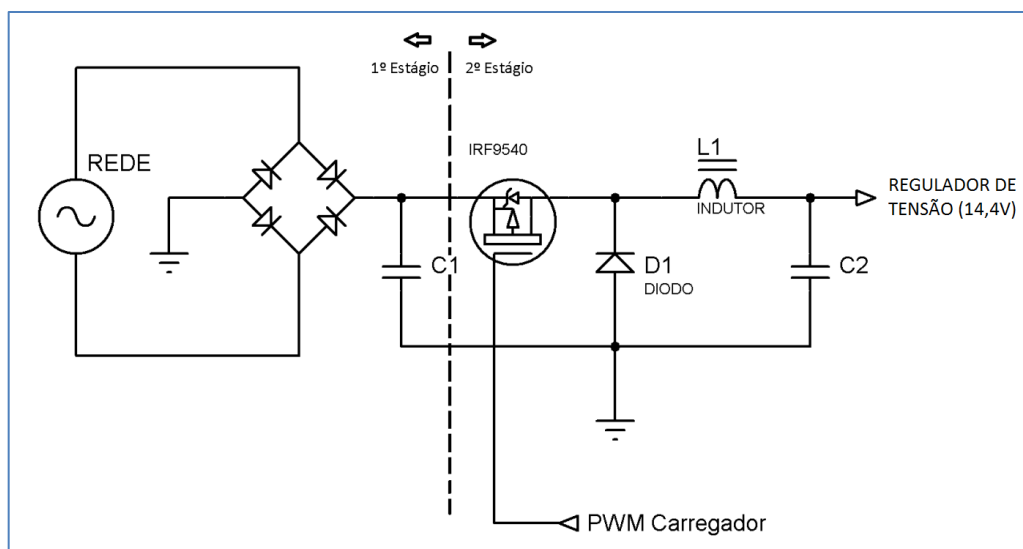


Figura 38: Diagrama do circuito carregador (Autor)

3.3.3.1. Cálculo da capacitância C1

A ficha técnica da bateria, alerta para que o carregador deva ter uma tensão de carregamento de 14,4V a 14,7V e uma tensão de flutuação de 13,5V a 13,8V, mantendo, no máximo, uma corrente de 2,1A durante o carregamento da bateria. [20] Cada bateria será carregada individualmente para manter a vida útil do conjunto. Adotando 14,5V e 2A, o conjunto deve fornecer 29W de potência para cada bateria, totalizando 87W para as três baterias.

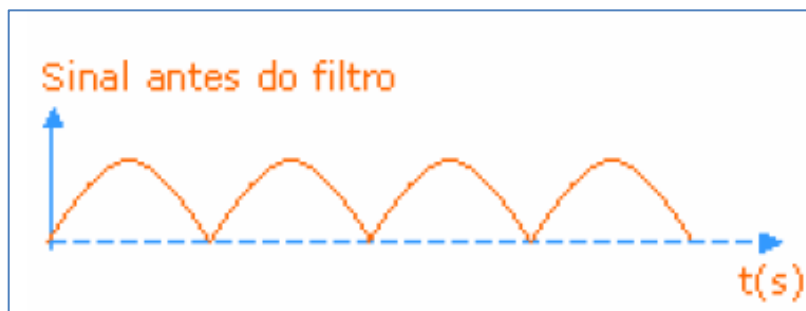


Figura 39: Tensão sem filtro após ponte retificadora [31]

Usando o método de SILVA (2012) para cálculo de capacitância mínima de C1 a partir de uma ponte retificadora (Fig.39). [31] Foram feitas as seguintes interações:

- i. Calcula-se a tensão de pico multiplicando a tensão de entrada RMS por $\sqrt{2}$.

$$220 * \sqrt{2} = 311,1V \quad (12)$$

- ii. Tensão de pico na carga vai ser a tensão de pico menos a tensão dos diodos.

$$Vp = 311,1 - 1,4 = 309,7V \quad (13)$$

- iii. Como o carregador precisa fornecer 87W de potência, assumindo uma eficiência de no mínimo 80%, a potência de entrada do segundo estágio deve ser:

$$P2 = \frac{87}{0,8} = 109,75W \quad (14)$$

- iv. Definir um valor de *ripple* aceitável para o primeiro estágio: Será utilizado 50%, pois o segundo estágio irá abaixar a tensão para 14,5V e minimizar o *ripple*.

$$ripple = 309,7V * 0,5 = 154,8V \quad (15)$$

Tensão média na entrada do segundo estágio:

$$V_{média} = V_p - \left(\frac{ripple}{2}\right) = 309,7 - \left(\frac{154,8}{2}\right) \quad (16)$$

$$V_{média} = 232,3V$$

- v. Corrente máxima de entrada no segundo estágio:

$$I_{max} = \frac{P_2}{V_{média}} = \frac{109,75}{232,3} \quad (17)$$

$$I_{max} = 0,47A$$

- vi. Calcular a capacitância mínima adotando corrente máxima, I_{max} , 0,47A na entrada do segundo estágio:

$$C_{min} = \frac{I_{max}}{2 * freq.da rede * ripple} \quad (18)$$

$$C_{min} = \frac{0,47}{2 * 60 * 154,8}$$

$$C_{min} = 25,30\mu F$$

O valor comercial encontrado para o capacitor foi de 47 μ F/350V.

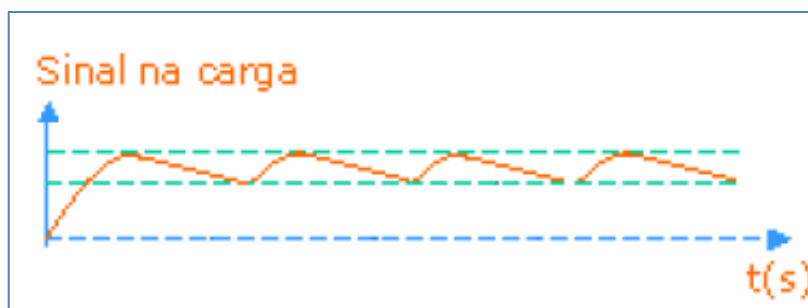


Figura 40: Tensão com filtro, na entrada do segundo estágio [31]

3.3.3.2. Cálculo do capacitor C2 e indutor L1:

- i. Definir o duty cycle aproximado, sabendo que após essa etapa será colocado um regulador de tensão e que ele precisa, segundo o *datasheet*, de pelo menos 1,2V acima da tensão de saída. Então foi definida uma tensão de entrada no regulador de 17V:

$$D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{17}{232,3} \quad (19)$$

$$D = 0,0732$$

- ii. Para obter uma corrente de 2A com uma tensão de 14,4V, é necessário uma carga de 7,2 ohms. Com o *duty cycle*, carga e frequência em mãos, passa a ser possível calcular a indutância mínima (L_{min}):

$$L_{min} = \frac{(1-D)*R}{2*f} \quad (20)$$

$$L_{min} = \frac{(1-0,0732)*7,2}{2*3906,25}$$

$$L_{min} = 850\mu H$$

- iii. Usando um fator de 20% para garantir o bom funcionamento, o L_{min} passa a ser de 1,02mH.

4. RESULTADOS

4.1. MOTOR

O motor *direct drive* foi acoplado à roda da bicicleta através dos raios, conforme a figura 41.



Figura 41: Motor *direct drive* acoplado à roda (Autor)

4.2. CIRCUITO DE ACIONAMENTO

O circuito de acionamento foi dividido em dois módulos, um com a ponte trifásica acionada pelos optoacopladores e o outro com a fonte 5V e unidade de controle que recebe os sinais dos sensores e envia os comandos de acionamento para a ponte trifásica.

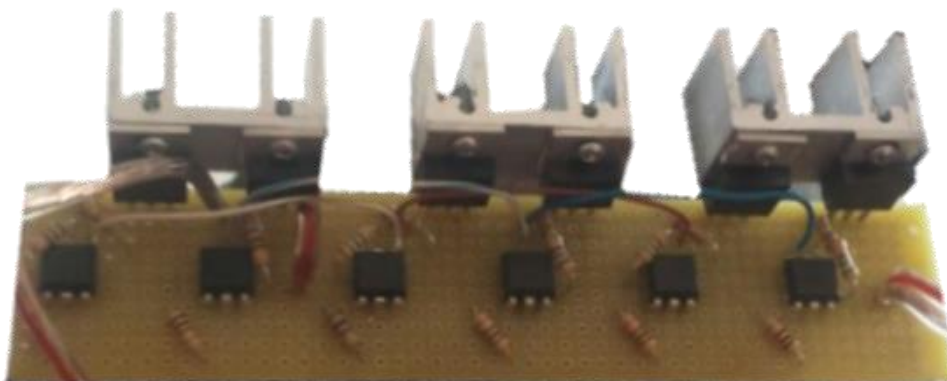


Figura 42: Ponte trifásica de acionamento (Autor)

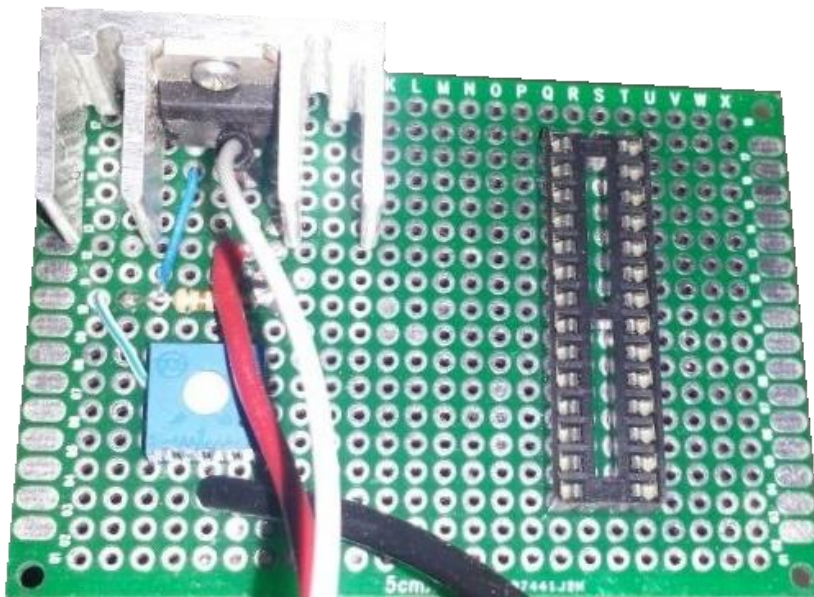


Figura 43: Ponte trifásica de acionamento (Autor)

4.3. BANCO DE BATERIAS

O banco de baterias foi feito de forma que pudesse ser facilmente removido para carregamento ou manutenção, bastando apenas desconectar os terminais e sacar o conjunto.



Figura 44: Banco de baterias (Autor)

4.4. INTERFACE COM O USUÁRIO

Para a interface, foi usado um manete acoplado a um acelerador e um display que informa a tensão atual ao usuário.



Figura 45: Manete acelerador com display e chave (Autor)

4.5. CARREGADOR

O carregador foi feito usando um transformador como abaixador de tensão. E um LM317 como regulador. Garantindo os 14,5V na saída.

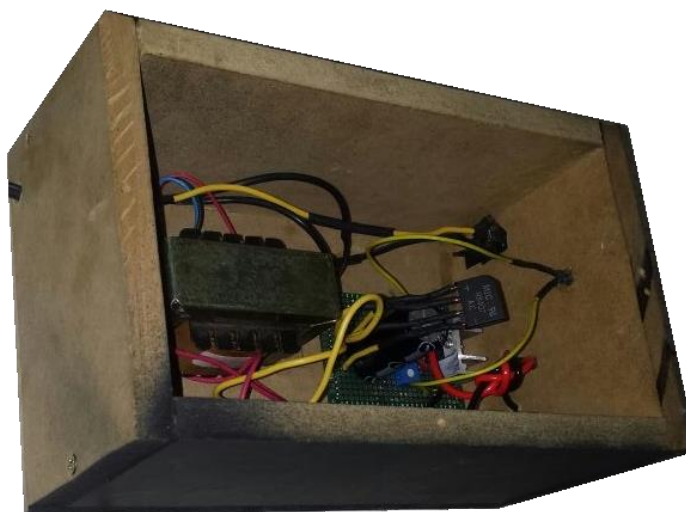


Figura 46: Carregador com transformador (Autor)

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de motorização elétrica para bicicletas com foco no controlador, baseado no microcontrolador ATmega 328p.

A criação do sistema mostra-se eficiente para as indagações apresentadas no início do trabalho, ou seja, de acordo com os testes realizados, os resultados atenderam as propostas e os objetivos traçados, onde o protótipo encontra-se em funcionamento. Com exceção do sistema de carregamento e interface com o usuário que não puderam ser concluídos devido a inúmeras falhas nas placas de acionamento, que tiveram de ser refeitas, atrasando o restante do projeto.

Embora o projeto esteja funcionando e tenha atingido todos os objetivos, alguns aprimoramentos podem ser feitos, inclusive a construção do carregador e interface com o usuário.

Como sugestão para um trabalho futuro, visando aperfeiçoar o sistema e visto que o atual protótipo apresenta algumas particularidades, pode-se terceirizar a fabricação da placa, mantendo os mesmos componentes projetados. Consequentemente, o sistema irá reduzir falhas apresentadas durante o acionamento do motor (devido à fabricação caseira da placa), proporcionando ao usuário mais conforto, estabilidade e confiabilidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Lei n.º 12.587, de 03 de janeiro de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial União - Seção 1, página 1.
- [2] GUIA MTB – PARTE II: Componente de bicicleta, 2014 (Acesso em out/2016: <http://seligalinks.com.br/guia-mtb-parte-ii-componente-de-bicicleta/>)
- [3] BIKES ELÉTRICAS: conheça história, características, benefícios e problemas, (Acesso em jun/2017: <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/41-pegue-leve/2849-bikes-eletricas-historia-mercado-expansao-motor-caracteristicas-vantagens-praticidade-pedalar-trabalho-limitacao-fisica-custo-economia-acelerador-integrado-separado-solar-movimento-beneficios-problemas.html>)
- [4] VBike: The E-Bike: An Old Idea (Acesso em jun/2017: <http://www.vbikesolutions.org/the-e-bike-an-old-idea.html>)
- [5] MAGNANI, F: Dinâmica da Bicicleta, 2012 (Acesso em out/2016: <http://blog.fabiomagnani.com/?p=20984/>)
- [6] MOHAN, N. Eletrônica de Potência: Curso Introdutório, 1ª Ed. LTC, 2014.
- [7] HENDERSHOT JUNIOR, J. R.; MILLER, T. J. E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. First Edition. New York: Oxford University Press, 1994.
- [8] GIERAS, J. F.; WING, M. Permanent Magnet Motor Technology. First Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [9] ARAÚJO, Rui J.F. Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica. Portugal: Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2012.
- [10] REZENDE, Sérgio M. Materiais e dispositivos eletrônicos, 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- [11] VISHAY, Ficha Técnica: P-MOSFET IRF9540, 2016.
- [12] VISHAY, Ficha Técnica: N-MOSFET IRF540, 2016.
- [13] RECTIFIER, International, Ficha Técnica: P-MOSFET IRF4905, 2003.
- [14] RECTIFIER, International, Ficha Técnica: N-MOSFET IRF3205, 2001.
- [15] MESUREX, Differences between NPN and PNP connections (Acesso em 15/06/2017: <https://www.mesurex.com/en/diferencias-entre-conexiones-npn-y-pnp/>)
- [16] VISHAY, Ficha Técnica: Optoacoplador 4N25.
- [17] MELO, João L.G.G. Mini curso: Microcontrolador pic 18F452 / Proteus, Universidade Federal do Paraná, 2011.

- [18] BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Carlos Luiz; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental. Química e Sociedade, 2000.
- [19] KARASINSKI, Carlos Alberto; DIAS, Edson da Silva. Guia para aplicação e manutenção de banco de baterias. Curitiba, 2003.
- [20] MOURA: Bateria Moura 12MVA-7. Catálogo Moura: Estacionárias Nobreak, 2017.
- [21] GUINÉ: Bike Expo Brasil 2008: Introdução, 2008 (Acesso em nov/2016: https://www.pedal.com.br/bike-expo-brasil-2008-introducao_texto2547.html/)
- [22] BIKERS, Sampa: Bike Expo Brasil, 2016 (Acesso em nov/2016: <http://sompabikers.com.br/bikeexpobrasil/>)
- [23] ADAMI, Marcos; PRANDI, Daniela. Bike Expo Brasil mostra a força das bicicletas elétricas: (Acesso em nov/2016: <http://www.bikemagazine.com.br/2012/08/bike-expo-brasil-mostra-a-forca-das-bicicletas-eletricas/>)
- [24] ADAMI, Marcos: Bike Magazine: Guia das Bicicletas Elétricas, 2012 (Acesso em nov/2016: <http://www.bikemagazine.com.br/2012/12/guia-das-bicicletas-eletricas/>)
- [25] BICIMOTO: Bicicletas motorizadas. (Acesso em nov/2016: <http://www.bicimoto.com.br/bicicletas-eletricas/>)
- [26] SOUZA, Ramon: Review-Bicicleta elétrica LEV E-bike L, 2016 (Acesso em nov/2016: <http://m.tecmundo.com.br/lev-e-bike-l/108268-review-bicicleta-eletrica-lev-bike-l.htm/>)
- [27] MERCADO LIVRE. Módulo Controlador Bicicleta / Scooter Elétrica 350w 36v 48v. (Acesso em jun/2017: http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-847582809-modulo-controlador-bicicleta-scooter-eletrica-350w-36v-48v-_JM)
- [28] CHARLES, R. Erickson; PETER, H. Alfke. Input signal interface with independently controllable pull-up and pull-down circuitry, 1999.
- [29] HONEYWELL, Ficha Técnica: Sensor Hall SS41
- [30] ATMEL, Ficha Técnica: Microcontrolador ATmega328P-PU, 2013
- [31] SILVA, Clodoaldo. Eletrônica geral: Retificadores com filtro capacitivo, 2013

7. BIBLIOGRAFIA

GONZALES, Vitor P. Projeto de uma bicicleta elétrica. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

GOZZI, Giuseppe G. M; PAREDE, Tera M; HORTA, Edson. Eletrônica: máquinas e instalações elétricas. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011

LENZ, André Luis. Como se constituem e operam os motores BLDC (CC sem escovas)

MOHAN, N. Eletrônica de Potência: Curso Introductório, 1ª Ed. LTC, 2014.

NEVES, Rodrigo A.; LUCA, Helder P. Eficiência energética com aplicação de motores de ímãs permanentes (Acesso em nov/2016:
<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-enie-eficiencia-energetica-com-aplicacao-de-motores-de-imas-permanentes-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>)

SILVEIRA, Mariana O. Mobilidade sustentável: a bicicleta como um meio de transporte integrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

SPARKFUN: Pull-up Resistors (Acesso em nov/2016:
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/pull-up-resistors/>)

TEXAS INSTRUMENTS. Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle Using a BLDC Motor, 2014

TRINDADE, Rafael Henrique. Estudo de máquinas elétricas não-convencionais: motor brushless DC. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2009

YEDAMALE, Padmaraja. Microchip Technology Inc. AN885: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, 2003.